



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Αντιμετώπιση της διάβρωσης ακτογραμμής
κοντά σε μαρίνα**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κρητικός Σ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Β. Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Κ. Δ. Μέμος, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Αντιμετώπιση της διάβρωσης ακτογραμμής κοντά σε
μαρίνα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κρητικός Σ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Β. Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Κ. Δ. Μέμος, Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Στους γονείς μου

Σωκράτη και Μαρία

που αποτελούν τα πιο

σταθερά θεμέλια στη ζωή μου

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Β. Τσουκαλά, Επίκουρο Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη βοήθειά της, χωρίς την οποία δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Κ. Μέμο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για τη συνεχή βοήθεια, υπομονή και καθοδήγηση, τις συμβουλές του και τις διορθώσεις που οδήγησαν στην τελική μορφή της παρούσας εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δ. κ. Μ. Χονδρό για την πολύτιμη βοήθειά του και το χρόνο που αφιέρωσε, ώστε να με βοηθήσει λύνοντας απορίες και προβλήματα που προέκυψαν στην χρήση του λογισμικού προσομοίωσης.

Να ευχαριστήσω, ακόμα, τον συνάδελφο Α. Μαυραντωνάκη, ο οποίος, με τη δική του προσωπική εμπειρία σε ανάλογο θέμα μεταπτυχιακής εργασίας, μου παρείχε ό,τι χρειάστηκε για την επιτυχημένη προσέγγιση του θέματος.

Αθήνα 2015, Κρητικός Κωνσταντίνος

Περιεχόμενα

Ευρετήριο συμβόλων	v
Ευρετήριο σχημάτων.....	xi
Ευρετήριο πινάκων.....	xv
Ευρετήριο εικόνων	xvi
Περίληψη.....	xvii
Abstract	xix
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας	2
2. Παράκτια ζώνη και φυσικές διεργασίες.....	4
2.1 Γενική περιγραφή	4
2.2 Θαλάσσιοι κυματισμοί.....	6
2.2.1 Κατηγορίες κυματισμών.....	6
2.2.2 Χαρακτηριστικά και μηχανισμοί κυμάτων	7
2.3 Παράκτια ρεύματα	8
2.3.1 Κατηγορίες ρευμάτων	8
2.3.2 Ρεύματα πριν τη ζώνη θραύσεως	9
2.3.3 Ρεύματα στη ζώνη θραύσεως και μετά τη θραύση	10
2.4 Παράκτια ιζήματα.....	11
2.5 Κατώφλι κίνησης ιζήματος.....	15
2.6 Μηχανισμοί παράκτιας στερεομεταφοράς	16
2.6.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής	17
2.6.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή.....	20

2.7 Αλληλεπίδραση παράκτιου περιβάλλοντος – τεχνικών έργων.....	22
3. Έργα προστασίας της ακτογραμμής.....	25
3.1 Εισαγωγή	25
3.2 Κυματοθραύστες.....	26
3.2.1 Μηχανισμός λειτουργίας και κατηγορίες κυματοθραυστών.....	26
3.2.2 Διαστασιολόγηση και χωροθέτηση κυματοθραυστών.....	27
3.2.3 Σχεδιασμός διατομής κυματοθραυστών.....	32
3.2.4 Ύφαλοι κυματοθραύστες	36
3.3 Πρόβολοι.....	38
3.3.1 Μηχανισμός λειτουργίας προβόλων	41
3.3.2 Παράμετροι σχεδιασμού προβόλων	42
3.4 Θωράκιση μετώπου ακτής.....	45
3.4.1 Θωράκιση με κεκλιμένο μέτωπο.....	46
3.4.2 Θωράκιση με κατακόρυφο μέτωπο	46
3.4.3 Ειδικοί τύποι θωρακίσεως.....	46
3.5 Μέθοδοι αναπλήρωσης της ακτής.....	47
3.6 Μέθοδος sand by-pass για την προστασία ακτών στα κατάντη λιμένων	51
4. Πρόγραμμα MIKE 21 DHI	56
4.1 Κυματικό μοντέλο PMS	56
4.1.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου.....	57
4.1.2 Βασικές παράμετροι μοντέλου.....	59
4.1.3 Εφαρμογή μοντέλου.....	62
4.2 Υδροδυναμικό μοντέλο HD.....	63
4.2.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου.....	64
4.2.2 Βασικές παράμετροι μοντέλου.....	65

4.2.3 Εφαρμογή μοντέλου	66
4.3 Μοντέλο στερεομεταφοράς ST.....	68
4.3.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος.....	68
4.3.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου σε συνθήκες κύματος-ρεύματος.....	71
4.3.3 Εφαρμογή μοντέλου	73
5. Σχεδιασμός παράκτιας ζώνης και σεναρίων μελέτης.....	75
5.1 Πορεία διερεύνησης.....	75
5.2 Κυματικά σενάρια μελέτης.....	76
5.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας μελέτης.....	76
5.4 Διατάξεις μαρινών	80
5.5 Διατάξεις για την αντιμετώπιση της διάβρωσης.....	83
5.5.1 Δοκιμή 1 με τρεις κυματοθραύστες	83
5.5.2 Δοκιμή 2 με δύο κυματοθραύστες.....	84
5.5.3 Δοκιμή 3 με αλλαγή διαστάσεων και αποστάσεων.....	84
5.5.4 Δοκιμή 4 με αλλαγή διαστάσεων και αποστάσεων.....	85
5.5.4 Δοκιμή 5 με αλλαγή κλίσης	86
6. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	87
6.1 Διερεύνηση διάβρωσης στην περιοχή μελέτης.....	87
6.2 Αποτελέσματα Δοκιμής 1	92
6.3 Αποτελέσματα Δοκιμής 2	93
6.4 Αποτελέσματα Δοκιμής 3 και 4.....	94
6.5 Αποτελέσματα Δοκιμής 5	96
6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης	97

7. Διερεύνηση εφαρμογής μεθόδου sand by-pass	99
8. Συμπεράσματα και προτάσεις	102
8.1 Συμπεράσματα	102
8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	103
Βιβλιογραφικές αναφορές	104
Παράρτημα: Παρουσίαση αποτελεσμάτων λογισμικού ΜΙΚΕ 21	108

Ευρετήριο συμβόλων

Λατινικά σύμβολα

C ταχύτητα διάδοσης των κυματισμών (m/s)

$C(x,y)$ συντελεστής Chezy ($m^{0.5}/s$)

$C'(x,y)$ αριθμός Chezy που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυθμενικού υλικού ($m^{0.5}/s$)

C_D συντελεστής συμπαράσυρσης (-)

C_f συντελεστής τριβής του πυθμένα (-)

C_g ταχύτητα ομάδας κυματισμών (m/s)

C_{gb} ταχύτητα ομάδας των κυματισμών στη θραύση (m/s)

c_a συγκέντρωση ιζήματος του περιβάλλοντος (εκτός λιμενολεκάνης) (kg/m^3)

c_b συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος (kg/m^3)

c_h συγκέντρωση ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης (kg/m^3)

c_e συγκέντρωση ισορροπίας της λεκάνης (kg/m^3)

Cr αριθμός Courant (-)

D διάμετρος κόκκου εδαφικού υλικού (m)

D_{50} μέση διάμετρος κόκκου εδαφικού υλικού (m)

d βάθος του νερού (m)

d_b βάθος θραύσης (m)

$dt(x,y,t)$ το χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος νερού (m)

E ενέργεια του κύματος ($kg/m/s^2$)

E_1 ολική κυματική ενέργεια του κύματος ($kg/m/s^2$)

E_v τυρβώδες ιξώδες (m^2/s)

F_b βαρυτική δύναμη (N)

F_s ρυθμός προσάμμιωσης στο εσωτερικό της λεκάνης (m^3/yr)

F_{s,T^*} ρυθμός προσάμμιωσης ημι-ισορροπίας στο εσωτερικό της λεκάνης (m^3/yr)

f συχνότητα (s^{-1})

f_w συντελεστής τραχύτητας στον πυθμένα (m)
 $f(V)$ ο συντελεστής τριβών ανέμου (-)
 g επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
 H_{max} μέγιστο επιτρεπτό ύψος των κυματισμών (m)
 H ύψος κύματος (m)
 H_b ύψος κύματος στη ζώνη θραύση (m)
 H_{m0} σημαντικό ύψος κύματος (m)
 H_{rms} μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος (m)
 I_1, I_2 ολοκληρώματα του Einstein
 k κυματαριθμός (m^{-1})
 k_N τραχύτητα κατά Nikuradse (m)
 L μήκος κύματος (m)
 M αριθμός Manning ($m^{1/3}/s$)
 n πορώδες (-)
 P_s στερεομεταφορά κατά την οριζόντια διεύθυνση ($m^3/yr/m$)
 P_l ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής ($J/m/s$)
 p πιθανότητα όλοι οι κόκκοι εδαφικού στρώματος να βρίσκονται σε κίνηση (%)
 p_a ατμοσφαιρική πίεση (Pa)
 $p, q(x, y, t)$ ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα ($m^3/s/m$)
 Q_s στερεομεταφορά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ($m^3/yr/m$)
 Q ρυθμός (παροχή) ανταλλαγής ροής μεταξύ λιμενολεκάνης-περιβάλλοντος (m^3/s)
 Q_b ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών (%)
 Q_r στερεομεταφορά που διέρχεται δεξιά από μια εγκάρσια διατομή κάθετη στην ακτογραμμή, για ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με το μέτωπο προς τα ανοικτά (m^3/yr)
 Q_l στερεομεταφορά που διέρχεται αριστερά από μια εγκάρσια διατομή κάθετη στην ακτογραμμή, για ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με το μέτωπο προς τα ανοικτά (m^3/yr)
 Q_g παροχή αθροιστικής στερεομεταφοράς (m^3/yr)
 Q_n κατ' απόλυτη τιμή καθαρή παροχή στερεομεταφοράς (m^3/yr)

Q_{lx} στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής (m^3/yr)

Q_v μέση χρονικά εγκάρσια στερεοπαροχή (m^3)

q_t ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου ($[N/s]/m$)

q_b ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα ($[N/s]/m$)

q_s ρυθμός μεταφοράς του φορτίου σε αιώρηση ($[N/s]/m$)

R_{cu}^{ot} παράγοντας που συνδέει το φορτίο του πυθμένα με τις διακυμάνσεις των ταχυτήτων μη γραμμικών κυμάτων (-)

Re αριθμός Reynolds (-)

S επιφάνεια της λιμενολεκάνης (m^2)

S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} τάσεις ακτινοβολίας (m^3/s^2)

s σχετική πυκνότητα ρ_s/ρ (-)

T_h χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στη λιμενολεκάνη στην οριζόντια διεύθυνση (s)

T_p περίοδος αιχμής κυματισμών (s)

T_v χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στη λιμενολεκάνη στην κατακόρυφη διεύθυνση (s)

T^* χαρακτηριστική περίοδος για την οποία υπολογίζεται ο ρυθμός προσάμμισης ημισορροπίας (s)

t χρόνος (s)

$U(u, v)$ διάνυσμα ταχύτητας που απεικονίζει τη μέση διεύθυνση κύματος (m/s)

U_f διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή (m/s)

U'_f διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) (m/s)

$U_{f,c}$ διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με το ρεύμα (m/s)

$U_{f,wc}$ διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος (m/s)

u_{max} μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας στον πυθμένα (m/s)

u_* ταχύτητα τριβής στον πυθμένα (m/s)

u_b εύρος της προκαλούμενης από κύμα ταχύτητας ταλαντώσεων στον πυθμένα (m/s)

V ταχύτητα του κατά μήκος της ακτής ρεύματος (m/s)

V_{mid} ταχύτητα του κατά μήκος της ακτής ρεύματος στο μέσον της ζώνης θρασέως (m/s)

$V_w(x,y,t)$ ταχύτητα του ανέμου (m/s)

V_b ταχύτητα ρεύματος στη ζώνη θραύσης (m/s)

V_0 θεωρητική ταχύτητα ρεύματος στη θραύση απουσία πλευρικής ανάμιξης (m/s)

V_e όγκος της λιμενολεκάνης (m^3)

v_{y1} τιμή της ταχύτητας σε ύψος $y1$ πάνω από τον πυθμένα (m/s)

ν κινηματικό ιξώδες (m^2/s)

W_b εύρος της ζώνης θραύσης (m)

W_f ταχύτητα καθίζησης κόκκων εδαφικού υλικού (m/s)

z^* αριθμός Rouse (-)

Ελληνικά σύμβολα

α γωνία μεταξύ μετώπου κυματισμών και ισοβαθών ($^{\circ}$)

α_{ϕ} λοξότητα κόκκων εδαφικού υλικού (ϕ)

α_b γωνία μεταξύ μετώπου και ισοβαθών στη θραύση ($^{\circ}$)

α_p πλάτος της κυματικής κίνησης (m)

β κλίση του πυθμένα ($^{\circ}$)

β_b κλίση του πυθμένα στη ζώνη θραύσης ($^{\circ}$)

β_{ϕ} Κύρτωση κόκκων εδαφικού υλικού (ϕ)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ συντελεστές της εξίσωσης ήπιας κλίσης (-)

γ_1 παράμετρος θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας (-)

γ_2 παράμετρος θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους (-)

$\Delta x, \Delta y$ ισοδιάσταση κανάβου μοντέλου (m)

Δt χρονικό βήμα μοντέλου (s)

$\eta(x,y,t)$ ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (m)

θ διεύθυνση διάδοσης κύματος ($^{\circ}$)

θ' αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) (-)

θ_c κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης (kg/m/s^2)

κ σταθερά του Von Karman (-)

M_{ϕ} μέσο μέγεθος των κόκκων (ϕ)

μ παράγοντας πτυχώσεων (Ripple factor) (-)

ρ πυκνότητα του ρευστού (kg/m^3)

ρ_s πυκνότητα του εδαφικού υλικού (kg/m^3)

σ_{ϕ} διαβάθμιση κόκκων εδαφικού υλικού (ϕ)

σ_g διαβάθμιση κόκκων εδαφικού υλικού (m)

τ_0 διατμητική τάση στον πυθμένα (kg/m/s^2)

τ_{θ} αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (-)

τ_c διατμητική τάση στον πυθμένα από ρεύμα (kg/m/s^2)

τ_w διατμητική τάση στον πυθμένα από κύμα (kg/m/s^2)

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ συνιστώσες ενεργών διατμητικών τάσεων (kg/m/s^2)

Φ_t αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου (-)

Φ_b αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα (-)

ϕ παράμετρος που συνδέει την κλίμακα ϕ με την κλίμακα μέτρησης σε mm (-)

ϕ_a γωνία αποθέσεως των ιζημάτων ($^\circ$)

$\phi(x,y)$ δυναμικό ταχύτητας της μέσης ελεύθερης επιφάνειας (-)

$\Omega(x,y)$ συντελεστής Coriolis εξαρτώμενος από το γεωγραφικό πλάτος (rad/s)

ω κυκλική συχνότητα (rad/s)

Ευρετήριο σχημάτων

Περιγραφή	Πηγή	Σελίδα
Σχήμα 2.1 Χωρισμός ζωνών κατά πλάτος μίας ακτής	Μέμος, 2009	5
Σχήμα 2.2 Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης	Μουτζούρης, 2005	5
Σχήμα 2.3 Εγκάρσια κατανομή του ρεύματος κατά μήκος της ακτής	CEM, 2006	10
Σχήμα 2.4 Παράκτια ρεύματα που δρουν στην ακτή	Μουτζούρης, 2005	11
Σχήμα 2.5 Κατώφλι κίνησης ιζήματος – Δυνάμεις που δρουν στους κόκκους	Κουτίτας, 1998	16
Σχήμα 2.6 Συνιστώσες στερεομεταφοράς στην ακτή: παράλληλη (qx) και κάθετη (qy)	CEM, 2006	17
Σχήμα 2.7 Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ	Κουτίτας, 1998	21
Σχήμα 2.8 Αλληλεπίδραση ιζήματος – προβόλου	Leo C. Van Rijn, 2013	23
Σχήμα 3.1 Σχηματισμοί salient και tombolo	Magnor, 2013	28
Σχήμα 3.2 Συσχέτιση των αδιάστατων λόγων Ls/Lg και Y/ds για κάθε σχηματισμό	CEM, 2008	31
Σχήμα 3.3 Τυπική διατομή συμβατικού αποσπασμένου κυματοθραύστη με διαχωρισμό των βασικών στρώσεων επένδυσης	CEM, 2006	32
Σχήμα 3.4 Διατομή ύφαλου κυματοθραύστη με το προσπίπτον και το διαδιδόμενο κύμα	www.coastalwiki.org	37
Σχήμα 3.5 Μηχανισμός λειτουργίας προβόλου	www.pixgood.com	42
Σχήμα 3.6 Παγίδα ιζήματος στην υπήνεμη πλευρά κυματοθραύστη	Marine Biodiversity, 2013	53
Σχήμα 3.7 Διάκενο για τη συσσώρευση ιζήματος μέσα στη λιμενολεκάνη	Marine Biodiversity, 2013	53
Σχήμα 3.8 Συλλογή ιζήματος από σκάμμα με τη βοήθεια ικρίωματος	Marine Biodiversity, 2013	54
Σχήμα 5.1 Διατομή πυθμένα περιοχής μελέτης	-	77

Περιγραφή	Πηγή	Σελίδα
Σχήμα 5.2 Σχεδιασμός ισοβαθών στο Autocad	-	78
Σχήμα 5.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας στο MIKE	-	79
Σχήμα 5.4 Τελική βαθυμετρία περιοχής μελέτης	-	80
Σχήμα 5.5 Σχεδιασμός διατάξεων μαρίνων στο Autocad	-	81
Σχήμα 5.6 Σχεδιασμός διάταξης 1 σε περιβάλλον MIKE	-	82
Σχήμα 5.7 Δοκιμή 1 με τρεις κυματοθραύστες σε Autocad	-	83
Σχήμα 5.8 Δοκιμή 2 με δύο κυματοθραύστες σε Autocad	-	84
Σχήμα 5.9 Δοκιμή 3 σε Autocad	-	85
Σχήμα 5.10 Δοκιμή 4 σε Autocad	-	85
Σχήμα 5.11 Δοκιμή 5 με αλλαγή κλίσης στο άκρο του κυματοθραύστη	-	86
Σχήμα 6.1 Ύψος κύματος H_{rms} (m) (αριστερά) και τάσεις ακτινοβολίας S_{xy} (m^3/s^2) (δεξιά) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	89
Σχήμα 6.2 Ταχύτητα ρεύματος V (m/s) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	90
Σχήμα 6.3 Ρυθμός διάβρωσης – μεταβολής πυθμένα για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	91
Σχήμα 6.4 Αποτέλεσμα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 1	-	92
Σχήμα 6.5 Αποτέλεσμα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 2	-	94
Σχήμα 6.6 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τις Δοκιμές 3 και 4	-	95
Σχήμα 6.7 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 5	-	96
Σχήμα 7.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής για τη Δοκιμή 5	-	99

Περιγραφή	Πηγή	Σελίδα
Σχήμα 7.2 Σκαρίφημα κατεύθυνσης μεταφερόμενου ιζήματος στη μέθοδο sand by-pass	-	101
Σχήμα A.1 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	108
Σχήμα A.2 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο δεύτερο κυματικό σενάριο	-	108
Σχήμα A.3 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 2 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	109
Σχήμα A.4 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 2 στο δεύτερο κυματικό σενάριο	-	109
Σχήμα A.5 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 3 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	110
Σχήμα A.6 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 3 στο δεύτερο κυματικό σενάριο	-	110
Σχήμα A.7 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 4 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	111
Σχήμα A.8 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 4 στο δεύτερο κυματικό σενάριο	-	111
Σχήμα A.9 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 5 στο πρώτο κυματικό σενάριο	-	112
Σχήμα A.10 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 5 στο δεύτερο κυματικό σενάριο	-	112
Σχήμα A.11 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 1	-	113

Περιγραφή	Πηγή	Σελίδα
Σχήμα A.12 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 2	-	113
Σχήμα A.13 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 3	-	114
Σχήμα A.14 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 4	-	114
Σχήμα A.15 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 5	-	115
Σχήμα A.16 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 1	-	116
Σχήμα A.17 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 2	-	116
Σχήμα A.18 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 3	-	117
Σχήμα A.19 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 4	-	117
Σχήμα A.20 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 5	-	118

Ευρετήριο πινάκων

Περιγραφή	Πηγή	Σελίδα
Πίνακας 2.1 Κατηγοριοποίηση των ιζημάτων σύμφωνα με την κοκκομετρία τους	Μαυραντωνάκης, 2013	12
Πίνακας 2.2 Κατηγοριοποίηση ιζημάτων κατά ASTM και Wentworth	CEM, 2006	14
Πίνακας 3.1 Τιμές συντελεστή ευστάθειας KD	Μέμος, 2008	34
Πίνακας 3.2 Συντελεστής στρώσης και πορώδες για διάφορους ογκολίθους	Μέμος, 2008	36
Πίνακας 4.1 Τιμές συντελεστών β1, β2 και β3 της εξίσωσης ήπιας κλίσης	μοντέλο PMS, DHI, 2012	59
Πίνακας 5.1 Κυματικά σενάρια μελέτης	-	76
Πίνακας 6.1 Μέσες τιμές ρυθμού διάβρωσης πυθμένα για κάθε διάταξη και σενάριο μελέτης	-	87
Πίνακας 6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς το μέγιστο ρυθμό διάβρωσης και τη στερεομεταφορά	-	97

Ευρετήριο εικόνων

Περιγραφή	Πηγή	Σελίδα
Εικόνα 3.1 Έργα προστασίας ακτής κατά σειρά: κυματοθραύστες, θωράκιση με ογκόλιθους και πρόβολοι	www.panoramio.com	25
Εικόνα 3.2 Χαρακτηριστικοί σχηματισμοί salient και tombolo πίσω από κυματοθραύστες στο Sea Palling του Norfolk της Μ. Βρετανίας	www.southwestcoastalgroup.org , www.hydrosurveys.co.uk , www6.plymouth.ac.uk	29
Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστικοί πρόβολοι για την προστασία αμμωδών ακτών στην Αυστραλία	www.sunshinecoast.qld.gov.au , blog.ltc.mq.edu.au	39
Εικόνα 3.4 Σύστημα διαδοχικών προβόλων για τη διατήρηση επαρκούς πλάτους σε ακτή της Ολλανδίας	www.kennisbank-waterbouw.nl	40
Εικόνα 3.5 Πρόγραμμα εκτεταμένης αναπλήρωσης ακτής στο Atlantic City των ΗΠΑ	www.gldd.com	48
Εικόνα 3.6 Βυθοκόρος σε διαδικασία απόρριψης ιζήματος για αναπλήρωση ακτής	www.escp.org.uk	50
Εικόνα 3.7 Αγωγός μεταφοράς ιζήματος σε σύστημα sand by-pass στο Tweed River της Αυστραλίας	www.tweedsandbypass.nsw.gov.au	54

Περίληψη

Θέμα της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση και αντιμετώπιση του φαινομένου της διαβρώσεως της ακτογραμμής, που συναντάται συχνά στην περιοχή κοντά σε λιμενικά έργα, μαρίνες αναψυχής και άλλες ανθρώπινες παρεμβάσεις στο παράκτιο περιβάλλον. Σκοπός είναι να αναδειχθούν οι σημαντικές συνέπειες των κατασκευών στην παράκτια ζώνη και να καταστεί σαφές ότι η προστασία αυτής με τα κατάλληλα μέτρα είναι αναγκαία για να μην υπάρχουν σοβαρές μεταβολές στην ακτή που θα εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία της παράκτιας ζώνης.

Αρχικά, γίνεται μία θεωρητική αναφορά στους μηχανισμούς και στις διεργασίες που αναπτύσσονται στην περιοχή της παράκτιας ζώνης και είναι υπεύθυνοι για όλες τις μεταβολές σε αυτήν. Οι κυματισμοί, τα ρεύματα και η συνεπαγόμενη μεταφορά του ιζήματος είναι εκείνα τα στοιχεία που προκαλούν αναλόγως εναπόθεση φερτού υλικού ή διάβρωση κατά μήκος της ακτογραμμής. Παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση των παραπάνω διεργασιών με τα παράκτια τεχνικά έργα που κατασκευάζονται για τις ανάγκες υποδομών σε κάποια περιοχή. Σε βάθος χρόνου, η διάβρωση σε μία παράκτια περιοχή καθορίζεται από τις νέες συνθήκες που θα επικρατήσουν μετά την κατασκευή ενός νεόδμητου τεχνικού έργου.

Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια βασικά στοιχεία για τα μέτρα αντιμετώπισης που μπορούν να εφαρμοστούν έναντι διάβρωσης όπως οι έξαλλοι και ύφαλοι κυματοθραύστες, που είναι και η κύρια κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι πρόβολοι, τα έργα θωράκισης του μετώπου της ακτής, αλλά και κάποιες εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται όπως η χρήση μηχανικής μεταφοράς υλικού (sand by-pass) και η αναπλήρωση της ακτής (beach nourishment).

Ακολούθως, αναλύεται το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία, τα κυματικά σενάρια, η βαθυμετρία και η διάταξη της μαρίνας στη γειτονία της οποίας ερευνάται το φαινόμενο της διάβρωσης. Χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα MIKE 21 DHI 2012 για την προσομοίωση των παράκτιων μηχανισμών. Αναλυτικότερα, ο προσδιορισμός του ύψους κύματος και των τάσεων ακτινοβολίας έγινε με ένα κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης (PMS, parabolic mild slope), ο προσδιορισμός της ταχύτητας του κυματογενούς ρεύματος έγινε με ένα υδροδυναμικό μοντέλο δισδιάστατης ανάλυσης (HD, hydrodynamic) και, τέλος, η στερεομεταφορά στην περιοχή υπολογίστηκε με ένα μοντέλο υπολογισμού ρυθμών στερεομεταφοράς (ST, sediment transport).

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης δίνονται σε πίνακες και σχήματα και εντοπίζονται τα σημεία της ακτογραμμής που έχουν τον εντονότερο ρυθμό διάβρωσης. Τοποθετώντας κυματοθραύστες στο μοντέλο και δοκιμάζοντας αρκετές διατάξεις γεωμετρίας και κλίσεις προτείνεται μία διάταξη κυματοθραυστών, για την οποία υπάρχει ικανοποιητική προστασία έναντι διάβρωσης της κατάντη ακτογραμμής.

Τέλος, για την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος, εξετάζεται η πιθανότητα εφαρμογής της μεθόδου sand by-pass, παράλληλα με τους κυματοθραύστες στη διαβρωμένη

περιοχή. Αφού υπολογιστεί η αναγκαία παροχή ιζήματος, προτείνεται να αποσύρεται υλικό ανάντη της μαρίνας, όπου εντοπίζεται προσάμμιωση, και να αποτίθεται κατάντη αυτής όπου χρειάζεται η αναπλήρωση. Με αυτόν τον τρόπο, επιλύεται σε ένα βαθμό και το πρόβλημα της μεγάλης απόθεσης ιζήματος στα ανάντη της μαρίνας.

Abstract

Subject of this thesis is the study and treatment of the phenomenon of erosion on the coastline, often found in the area near harbour structures, such as marinas, and other human interventions in the coastal environment. The aim is to highlight the significant impact of constructions in the coastal zone and suggest that protection with appropriate measures is necessary to prevent serious changes on the coast that would impede the proper function of the coastal zone.

Initially, there is a theoretical reference to the mechanisms and processes developed in the coastal region, which are responsible for the changes in it. Waves, currents and the consequent transfer of sediment are those elements that cause accordingly deposition or sediment erosion along the coastline. A major factor is the interaction of these processes with coastal structures, which are built for the infrastructure needed in coastal area. Over time, erosion on a coastal area is determined by the new conditions that will prevail after the construction of a newly built technical work.

Furthermore, an introduction is made on some fundamental elements of the structures that can be applied against erosion. These are normal and submerged breakwaters, which are the main structures used in the present thesis, the groynes, the shield works on the shore front face, as well as some alternative methods, such as mechanical sediment transport (sand by-pass) and replenishing beach nourishment.

In the context of simulation, a description is made on the model, different wave scenarios, bathymetry and form of the marina in the vicinity of which the phenomenon of erosion is studied. The simulation was completed using the computer software MIKE 21 by DHI 2012. Specifically, the determination of the wave height and radiation stress was made by a wave model of parabolic mild slope (PMS), the determination of the speed of wave generated currents was made by a hydrodynamic model of two-dimension analysis (HD) and, finally, sediment transport in the region was calculated by a sediment transport model (ST).

The study results are presented on tables and figures, which show the areas of the coastline having the strongest rate of erosion. After placing breakwaters in the model and trying several forms, geometries and grades, the suggested solution provides good protection against erosion of downstream shoreline.

At the conclusion, in order to deal more effectively with the problem, a consideration is made of applying the sand by-pass method, alongside the breakwaters on the eroded area. After calculating the necessary supply of sediment, it is proposed to withdraw sediment upstream of the marina, where siltation is identified, and dispose it downstream, where replenishment is necessary. Last but not least, this could be an effective solution at the same time for the growing sediment siltation upstream of the marina.

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Η παράκτια ζώνη είναι η παραθαλάσσια περιοχή στην οποία συντελούνται οι περισσότερες διεργασίες που έχουν να κάνουν με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Θεωρητικά, εκτείνεται ανάμεσα στην ακτογραμμή και το βάθος εκείνο στο οποίο γίνεται αισθητή η επιρροή των κυματισμών στον πυθμένα της θάλασσας. Η μεταβλητότητα της παράκτιας ζώνης και η φυσική της εξέλιξη σε σχέση με το χρόνο είναι έντονη και επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Η ενέργεια που μεταφέρεται από τους κυματισμούς και τα παράκτια ρεύματα προκαλεί τη στερεομεταφορά ιζήματος, η οποία σε βάθος χρόνου διαμορφώνει τη μορφή της ακτογραμμής.

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης ελλιμενισμού, τόσο για σκάφη αναψυχής αλλά και εμπορικά ή επιβατηγά πλοία στην περιοχή της Μεσογείου και της Ελλάδας ειδικότερα, που είναι μια κατ' εξοχήν παραθαλάσσια χώρα, κατασκευάζονται συνεχώς νέα λιμενικά έργα. Αυτά τα έργα και γενικότερα όλες οι παρεμβάσεις που γίνονται στο περιβάλλον της ακτής διαταράσσουν την ισορροπία που υπάρχει στην παράκτια ζώνη, μεταβάλλουν τις συνθήκες κυματισμών, ρευμάτων και στερεομεταφοράς και μακροπρόθεσμα προκαλούν σημαντικές αλλαγές στην εξέλιξη της ακτογραμμής. Έτσι, στη γειτονία τέτοιων λιμενικών κατασκευών παρατηρούνται είτε προσαμμώσεις – συσσωρεύσεις ιζήματος, είτε διάβρωση της ακτής που μπορεί να έχει σημαντικές αρνητικές συνέπειες στην ανθρώπινη δραστηριότητα και ασφάλεια.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της διάβρωσης της ακτογραμμής κοντά σε ένα τυπικό λιμενικό έργο, όπως είναι μία μαρίνα σκαφών αναψυχής. Αποτελεί ερευνητική συνέχεια της εργασίας που εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με τίτλο « Διερεύνηση σχεδιασμού διάταξης μαρίνας σε σχέση με τη στερεομεταφορά στην είσοδο και προτάσεις βελτίωσης » (Μαυραντωνάκης, 2013) και της εργασίας, για το ίδιο πρόγραμμα, με τίτλο « Διερεύνηση συνθηκών στερεομεταφοράς και κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρινών » (Σοφιαδέλη, 2014). Για το σκοπό της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα υπολογιστικό προσομοίωμα ακτογραμμής – μαρίνας στο πρόγραμμα MIKE DHI 2012 και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα ως προς το βαθμό διάβρωσης στην περιοχή αυτή. Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα εφαρμόζοντας μέτρα προστασίας στις περιοχές που πλήττονται. Μετά από δοκιμές για διάφορες γεωμετρικές κυματοθραυστών γίνεται η επιλογή της βέλτιστης λύσης. Επιπροσθέτως, παράλληλα με την προστασία της ακτής μέσω κυματοθραυστών έγινε και διερεύνηση μηχανικής μεταφοράς ιζήματος από τις περιοχές που παρουσιάζεται εναπόθεση προς εκείνες που υπάρχει διάβρωση (sand by-pass) έτσι ώστε να διατηρείται χωρική ισορροπία στο υλικό της παράκτιας ζώνης.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει με την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) 8 κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 εισάγονται οι βασικές θεωρητικές έννοιες που αφορούν την παράκτια ζώνη και τους φυσικούς μηχανισμούς που την επηρεάζουν. Γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των κυριότερων τμημάτων της παράκτιας ζώνης και των κατηγοριών που αυτή διαιρείται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι θαλάσσιοι κυματισμοί, τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους και ο τρόπος που επιδρούν στην παράκτια ζώνη. Ομοίως, παρουσιάζονται τα παράκτια ρεύματα και η λειτουργία τους στη ζώνη πριν και μετά τη θραύση, αντίστοιχα. Έπειτα, για να περιγραφεί καλύτερα ο μηχανισμός της παράκτιας στερεομεταφοράς γίνεται μία περιληπτική περιγραφή στα θαλάσσια ιζήματα και στον τρόπο που αυτά μετακινούνται στον παράκτιο χώρο. Ιδιαίτερη βάση δίνεται στο διαχωρισμό παράλληλης και εγκάρσιας στερεομεταφοράς ως προς την ακτογραμμή. Τέλος, το κεφάλαιο κλείνει αφού γίνει μία αναλυτική περιγραφή στην αλληλεπίδραση παράκτιου περιβάλλοντος και τεχνικών έργων, ώστε να υπογραμμισθεί η επιρροή που έχουν τα έργα μακροπρόθεσμα στην εξέλιξη μίας παράκτιας ζώνης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα βασικότερα έργα προστασίας της ακτογραμμής έναντι διαβρώσεως, όπως οι κυματοθραύστες, οι πρόβολοι και η θωράκιση του μετώπου της ακτής. Παρουσιάζονται συνοπτικώς ο μηχανισμός λειτουργίας τους, οι παράμετροι σχεδιασμού τους και οι περιπτώσεις στις οποίες ενδείκνυται η κατασκευή τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι προστασίας της ακτής, η αναπλήρωση και η μέθοδος sand by-pass.

Το Κεφάλαιο 4 αναφέρεται στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το MIKE 21 DHI (Danish Hydraulic Institute). Αναφέρονται τα τρία βασικά μοντέλα του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν, το κυματικό PMS, το υδροδυναμικό HD και το μοντέλο στερεομεταφοράς ST. Παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις υπολογισμού που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της περιοχής και των σεναρίων μελέτης. Ακόμη, παρουσιάζονται οι διάφορες διατάξεις μαρίνας που χρησιμοποιήθηκαν και οι δοκιμές διατάξεων κυματοθραυστών που έγιναν για την αντιμετώπιση της διάβρωσης στην περιοχή μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται η παρουσίαση και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για κάθε διαφορετική διάταξη. Παρουσιάζονται σε σχήματα και πίνακες τα αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης και στερεομεταφοράς που υπολογίσθηκαν στην περιοχή και περιγράφεται η λογική που ακολουθήθηκε για να καταλήξει η διερεύνηση σε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται συνοπτικώς η διερεύνηση που έγινε για την εφαρμογή μεθόδου sand by-pass στην περιοχή. Παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι που αφορούν το έργο και γίνονται προτάσεις για τον τρόπο εφαρμογής του.

Στο Κεφάλαιο 8 αναλύονται τα γενικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και δίνονται κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο Παράρτημα παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που αφορούν τη διάβρωση και την στερεομεταφορά από την προσομοίωση του προγράμματος MIKE 21.

2. Παράκτια ζώνη και φυσικές διεργασίες

2.1 Γενική περιγραφή

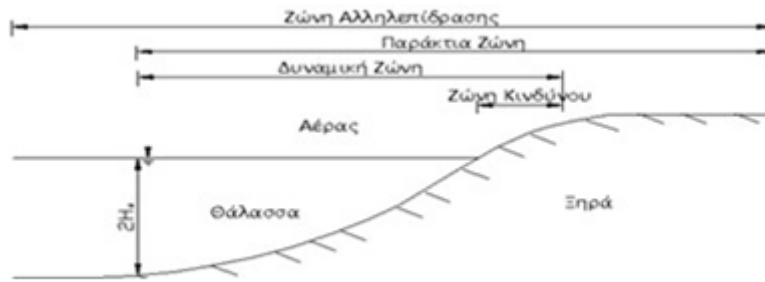
Η παράκτια ζώνη είναι το πεδίο αλληλεπίδρασης μεταξύ της υδρόσφαιρας, της λιθόσφαιρας, της βιόσφαιρας και της ατμόσφαιρας. Υπάρχουν πολλοί ορισμοί στη βιβλιογραφία και καθένας εστιάζει σε διαφορετικό σκοπό, αλλά γενικώς όλοι συγκλίνουν στο ότι η παράκτια ζώνη περιλαμβάνει, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, θαλάσσια και χερσαία τμήματα, τα οποία εκτείνονται εκατέρωθεν μέχρι το σημείο στο οποίο μηδενίζονται ή ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις από φυσικές διεργασίες και ανθρώπινες παρεμβάσεις. Χαρακτηριστικό είναι ότι στο χερσαίο τμήμα μπορεί να περιλαμβάνεται ολόκληρη λεκάνη απορροής επιφανειακών υδάτων, ενώ αντίστοιχα στο θαλάσσιο ολόκληρη η υφαλοκρηπίδα (μέχρι το βάθος των 200 m).

Οι παράκτιες ζώνες παγκοσμίως χαρακτηρίζονται από μεγάλη βιοποικιλότητα, δεδομένου ότι συγκεντρώνουν μεγάλα ποσοστά της χλωρίδας και πανίδας του πλανήτη. Ταυτόχρονα, φιλοξενούν κατά κύριο λόγο τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες που σχετίζονται με τη θάλασσα, όπως οι θαλάσσιες μεταφορές, η αλιεία, λιμενικά έργα και έργα προστασίας της ακτογραμμής, έργα υποδομής και παραθαλάσσιας αναψυχής, ακόμη και παραθαλάσσιους οικισμούς. Στις παράκτιες ζώνες συναντάμε επίσης πλήθος κλιματολογικών και γεωμορφολογικών συνθηκών ανάλογα με την περιοχή, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τους κυματισμούς, τα ρεύματα, τα ιζήματα και τους ανέμους που αναπτύσσονται.

Συνέπεια των πολλών στοιχείων που προαναφέρθηκαν, του πλήθους των φυσικών θαλάσσιων μηχανισμών αλλά και των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων – παρεμβάσεων που συντελούνται, είναι οι παράκτιες ζώνες να χαρακτηρίζονται από εντονότατη μεταβλητότητα ως προς τη μορφολογία τους, τις συνιστώσες τους και τη γενικότερη χωροχρονική τους εξέλιξη. Η παράκτια ζώνη και η ακτή (παραθαλάσσια ζώνη της ξηράς) αποτελούν έκφραση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς ιζημάτων από τη λιθόσφαιρα και απομάκρυνσης ή συσσώρευσής τους από την υδρόσφαιρα, υπό τη δράση των κυματισμών και των ρευμάτων, τα οποία εξαρτώνται από την ατμόσφαιρα (Παναγιωτίδης & Χατζημπίρος, 2004).

Οι ζώνες που έχουν οριστεί κατά πλάτος μιας ακτής (Μέμος, 2009) διακρίνονται σε:

- ζώνη αλληλεπίδρασης (interactive zone), όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζονται ή μπορούν να επηρεαστούν από την παράκτια ζώνη
- δυναμική ζώνη (dynamic zone), η οποία επηρεάζεται άμεσα από φυσικές διεργασίες όπως η διάβρωση
- ζώνη κινδύνου (hazard zone)

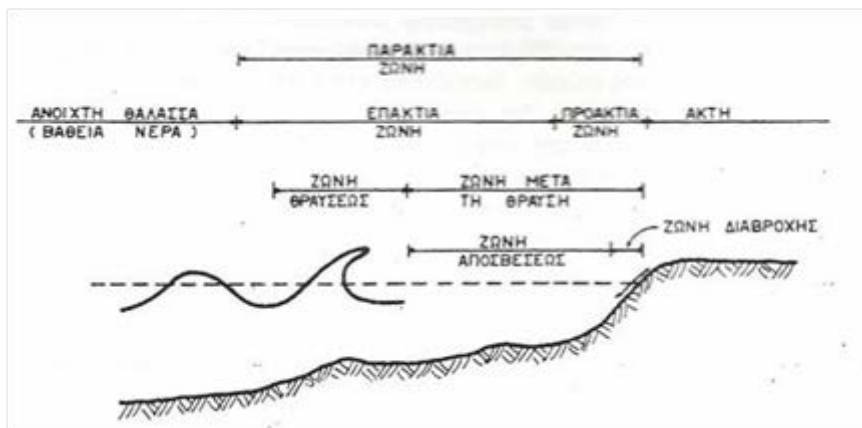


Σχήμα 2.1 Χωρισμός ζωνών κατά πλάτος μίας ακτής (Μέμος, 2009)

Πιο συγκεκριμένα η παράκτια ζώνη υποδιαιρείται στην επάκτια (inshore) και στην προάκτια (foreshore) ζώνη ή μέτωπο ακτής, οι οποίες έχουν ως όριο τη γραμμή κατώτατης ρηχίας. Το μέτωπο είναι το τμήμα εκείνο της διατομής της ακτής που χαρακτηρίζεται από μεγάλη κλίση πυθμένα, η οποία εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, όσο και από την κοκκομετρία των ιζημάτων.

Ενδιάμεσα, μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες υποζώνες (Μουτζούρης, 2005):

- βαθύτερη ζώνη ή ζώνη πριν από τη θραύση (before-breaker zone), όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυματισμών που τελικά καταλήγουν σε θραύση
- ζώνη θραύσεως (breaker zone), το κατ' εξοχήν δυναμικό τμήμα ολόκληρης της παράκτιας ζώνης, όπου στην ουσία λαμβάνει χώρα το φυσικό φαινόμενο της θραύσεως των κυμάτων και το οποίο αποτελεί γενεσιουργό μηχανισμό της πλειοψηφίας των διεργασιών που αφορούν την επιστήμη της ακτομηχανικής
- ζώνη μετά τη θραύση (after-breaker zone), η οποία με τη σειρά της χωρίζεται στη ζώνη απόσβεσης (surf zone), όπου εκτονώνεται η ενέργεια του κύματος (τύρβη, θερμότητα, κλπ.) και δημιουργούνται τα κυματογενή ρεύματα, και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) με όρια την κατώτερη και ανώτερη θέση της ακτογραμμής. Η θέση των δύο παραπάνω ζωνών επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, την κλίση του πυθμένα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την παλίρροια.



Σχήμα 2.2 Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουτζούρης, 2005)

2.2 Θαλάσσιοι κυματισμοί

2.2.1 Κατηγορίες κυματισμών

Στο θαλάσσιο χώρο λειτουργούν ταυτόχρονα συνήθως πολλά είδη κυματισμών, τα οποία δεν είναι καθόλου εύκολο να διακριθούν με γυμνό μάτι από έναν απλό παρατηρητή, διότι ουσιαστικά η κίνηση των υγρών σωματιδίων της θαλάσσιας μάζας είναι αποτέλεσμα υπέρθεσης όλων των παραπάνω κυμάτων. Ενδεικτικά, μπορούμε να διακρίνουμε τα σημαντικότερα κυματικά φαινόμενα στις εξής κατηγορίες (κατά Phillips 1977, LeBlond και Mysak 1978):

- Επιφανειακά κύματα (surface waves), τα οποία διαδίδονται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και περιλαμβάνουν κυρίως τα ανεμογενή (wind waves), δηλαδή κύματα που δημιουργούνται λόγω του ανέμου, και τις αποθαλασσιές (swells), κύματα που δεν οφείλονται σε καιρικά φαινόμενα στο χρόνο που παρατηρούνται αυτά, αλλά σε άνεμο που έπνεε σε προηγούμενο χρόνο, ενίοτε και ημέρες πριν, ή σε άλλη περιοχή.
- Εσωτερικά κύματα (internal waves), τα οποία δημιουργούνται στο σημείο όπου εφάπτονται δύο στρώματα θαλάσσιου νερού διαφορετικής πυκνότητας
- Γυροσκοπικά κύματα (gyroscopic or inertial waves), τα οποία οφείλονται στην περιστροφική κίνηση των υγρών σωματιδίων και μεταδίδονται στο εσωτερικό του υγρού
- Πλανητικά κύματα (planetary or Rossby waves), τα οποία οφείλονται στη σχετική κίνηση των πλανητών και της Γης
- Παλίρροιες (tides), που δημιουργούνται λόγω της βαρυτικής έλξης της Σελήνης πάνω στη Γη
- Ακουστικά κύματα στο εσωτερικό της υδάτινης μάζας (hydroacoustic waves) και είναι συζευγμένα με ακουστικά και ελαστικά κύματα που διαδίδονται στα υποστρώματα του πυθμένα.

Οι επιφανειακοί θαλάσσιοι κυματισμοί αφ' ενός μεν καταλαμβάνουν πολύ σημαντικό τμήμα του φάσματος θαλασσίων κυματισμών από σκοπιάς ενεργειακής πυκνότητας, αφ' ετέρου δε αντιστοιχούν σε περιόδους πολύ σχετικές με την πλειονότητα των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στο θαλάσσιο και στο παράκτιο περιβάλλον. Εξετάζοντας αναλυτικότερα τους επιφανειακούς θαλάσσιους κυματισμούς, διακρίνουμε τις εξής κύριες κατηγορίες, ανάλογα με το αίτιο δημιουργίας τους:

- Ανεμογενείς κυματισμοί (wind waves), δηλαδή κύματα ανέμου που δημιουργούνται λόγω του ανέμου, και αποθαλασσιές (swells), κύματα που δεν οφείλονται σε καιρικά φαινόμενα στο χρόνο που παρατηρούνται αυτά, αλλά σε άνεμο που έπνεε σε προηγούμενο χρόνο, ενίοτε και ημέρες πριν, ή σε άλλη περιοχή. Οι ανεμογενείς κυματισμοί καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος, που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T = 1$ s έως $T = 20-25$ s, περίπου

- Κύματα παραγόμενα από κινήσεις επιπλέοντων ή βυθισμένων αντικειμένων (body generated waves), τα οποία, γενικώς, αντιστοιχούν στις ίδιες περιόδους με τους ανεμογενείς κυματισμούς
- Κυματογή (surf beat) και κύματα ιδιοταλαντώσεων λιμανιών και υφαλοκρηπίδας (harbour resonance, seiche, shelf waves) που αντιστοιχούν σε περιόδους από $T = 1$ min έως $T = 40$ min, περίπου
- Σεισμογενείς κυματισμοί (σεισμικά κύματα, tsunamis), οι οποίοι καταλαμβάνουν μεγάλο τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε περιόδους από $T = 5$ min έως $T = 2$ h, περίπου.

Από την ανωτέρω παρουσίαση καθίσταται φανερό ότι οι ανεμογενείς θαλάσσιοι κυματισμοί αποτελούν ένα από τα κυριότερα αίτια δυναμικής διέγερσης και φόρτισης των θαλάσσιων κατασκευών εν γένει. Πέραν αυτού όμως, οι ανεμογενείς κυματισμοί, διαδίδοντας μεγάλα ποσά ενέργειας και, δευτερευόντως, μάζας από την ανοικτή θάλασσα όπου δημιουργούνται προς τις ακτές, αποτελούν ένα πολύ σημαντικό παράγοντα που επιδρά στην διαμόρφωση της ακτογραμμής, στην ισορροπία του οικοσυστήματος στην παράκτια ζώνη, στη ρύπανση των ακτών κλπ. Επομένως, η μελέτη των μηχανισμών διάδοσης των κυματισμών αυτών και η εξέταση της αλληλεπίδρασής τους με το παράκτιο περιβάλλον αποτελεί θέμα ζωτικής σημασίας από οικονομική και κοινωνική άποψη.

2.2.2 Χαρακτηριστικά και μηχανισμοί κυμάτων

Τα βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς είναι το ύψος κύματος H , το μήκος κύματος L και η διεύθυνση διάδοσης θ . Τα μεγέθη αυτά για περιοχές βαθιών νερών, δηλαδή σε βάθη που $d > 0.5 L$, όπου d το βάθος του νερού, παραμένουν σταθερά, καθώς εκεί οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι κυκλικές. Αντίθετα, σε ενδιάμεσα και ρηγά νερά, όπου $d < 0.5 L$, και όσο το βάθος μικραίνει οι τροχιές τείνουν να γίνουν περίπου ελλειπτικές και σχετικά πεπλατυσμένες, η επιρροή του πυθμένα καθίσταται ολοένα και σημαντικότερη και τα φαινόμενα ξεφεύγουν από τη γραμμικότητά τους και χαρακτηρίζονται από σημαντική διασπορά.

Στις περιοχές αυτές η δυναμική των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας είναι πιο πλούσια σε φυσικά φαινόμενα, και ως εκ τούτου παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εξέτασης (Massel, 1989). Στην περιοχή αυτή συναντώνται όλα τα χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα, και συγκεκριμένα:

- ανάκλαση (reflection) και διάθλαση (refraction) των κυματισμών, καθώς και τροποποίηση του πλάτους των κυματισμών λόγω ρήχωσης (shoaling)
- αλληλεπίδραση με την τρισδιάστατη βαθυμετρία και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction)
- Διασπορά των κυματισμών (dispersion)
- Τριβή πυθμένα και εξασθένηση της ροής της κυματικής ενέργειας (bottom friction and wave energy dissipation)

- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών, και μεταφορά ενέργειας από μια αρχική ζώνη συχνοτήτων του φάσματος των κυματισμών προς μικρότερες και μεγαλύτερες συχνότητες (non-linear interactions)
- Δημιουργία κυματογενών ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά μάζας
- Θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave breaking).

Στη ζώνη θραύσεως και στη ζώνη μετά τη θραύση η ένταση της κυματικής κυκλοφορίας και των φαινομένων είναι σημαντικά μεγαλύτερη, καθώς εκλύονται τεράστιες ποσότητες ενέργειας και διοχετεύονται στην ακτή με διάφορους τρόπους. Η ενέργεια αυτή όταν με τη σειρά της φτάσει στην ακτή δημιουργεί προβλήματα, φορτία και βλάβες στις κατασκευές μηχανικού, συνεπώς η θωράκισή τους κρίνεται απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία.

2.3 Παράκτια ρεύματα

2.3.1 Κατηγορίες ρευμάτων

Σε αντίθεση με τα κύματα, τα θαλάσσια ρεύματα σε παράκτιες περιοχές είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθούν με κάποια αξιοπιστία. Αυτό οφείλεται στις πολλές επιμέρους συνιστώσες των ρευμάτων, οι κυριότερες από τις οποίες είναι (Μέμος, 2008) :

- Ωκεάνια ρεύματα
- Παλιρροιακά ρεύματα, λόγω αστρονομικών ή πλανητικών παλιρροιών
- Ανεμογενή ρεύματα, λόγω δράσης του ανέμου
- Ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης
- Κυματογενή ρεύματα, λόγω θραύσης, περίθλασης και διάθλασης των κυματισμών
- Ρεύματα πυκνότητας, λόγω στρωμάτωσης αλατότητας ή θερμοκρασίας.

Οι πρώτες δύο κατηγορίες αφορούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και βαθιά νερά ενώ οι επόμενες δύο τοπικά φαινόμενα. Τα κυματογενή ρεύματα εμφανίζονται κυρίως σε ρηχά νερά και, τέλος, τα ρεύματα πυκνότητας εντοπίζονται συνήθως σε περιοχές εκβολών ποταμών, όπου υπάρχει εισροή γλυκού νερού στη θάλασσα. Η ένταση των ανεμογενών ρευμάτων στην επιφάνεια ανέρχεται σε 2-3% περίπου της ταχύτητας του ανέμου επάνω από το οριακό στρώμα, ενώ τα αντίστοιχα κυματογενή είναι κάπως ασθενέστερα. Η φορά των καθαρά ανεμογενών ρευμάτων διαφέρει από τη φορά του ανέμου και μεταβάλλεται σημαντικά με το βάθος, πλησιάζοντας προς τη φορά του ανέμου όσο τα νερά γίνονται πιο ρηχά. Αντίθετα, η φορά των κυματογενών ρευμάτων συμπίπτει με τη φορά μετάδοσης των κυματισμών και του πρωτογενούς αιτίου του ανέμου.

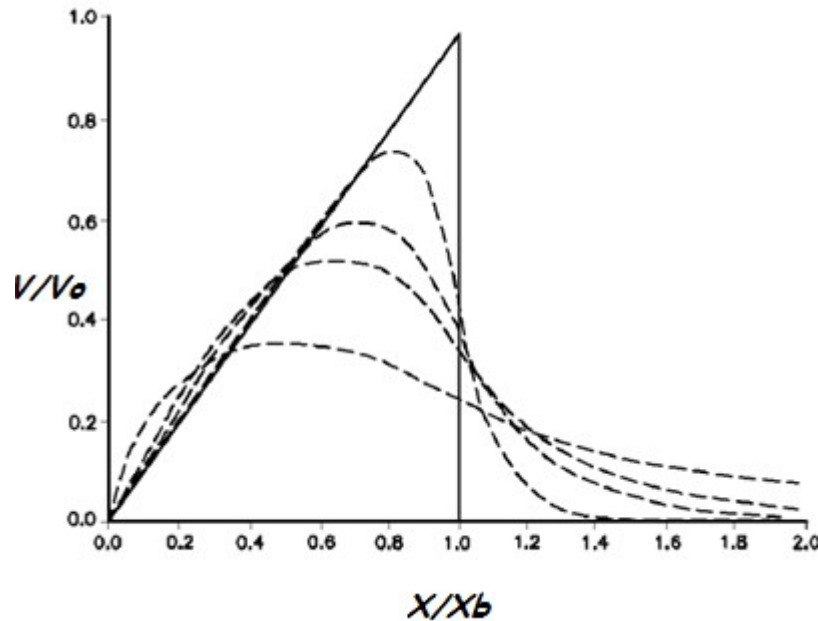
Στην παράκτια ζώνη, τα ρεύματα που συναντώνται χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής (longshore currents) και τα βελοειδή ρεύματα (rip currents), διαχωρισμός που έχει να κάνει με τη μορφή τους και τη διεύθυνση που δρουν. Η τριβή στον

πυθμένα, η διατμητική τάση ακτινοβολίας και η θραύση κυματισμών υπό κλίση σε σχέση με την ακτή είναι οι γενεσιουργές δυνάμεις των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής (κμα). Η συμβολή δύο ρευμάτων κμα αντίθετης φοράς εκτρέπει τη ροή προς τα βαθιά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου ρεύματος, το οποίο καλείται βελοειδές ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι στενό και έντονο ρεύμα, διασχίζει τη ζώνη θραύσεως και εκφυλίζεται στη ζώνη πριν από τη θραύση, με συνέπεια να επιστρέφει ισχυρή ποσότητα μάζας από τα ρηχά στα βαθιά νερά. Το βελοειδές ρεύμα θα έχει διεύθυνση σχεδόν κάθετη στη διεύθυνση της ακτογραμμής, όταν τα δύο παράλληλα ρεύματα που συμβάλλουν είναι ίδιας ή παρόμοιας έντασης, ενώ, στην περίπτωση που η ένταση διαφέρει, το βελοειδές ρεύμα θα εκτραπεί με κλίση μικρότερη της καθέτου και παράλληλα μειώνεται και η ταχύτητά του. Μάλιστα, σε περιοχή της Ιαπωνίας έχει μετρηθεί ταχύτητα βελοειδούς ρεύματος μέχρι και 2 m/s.

2.3.2 Ρεύματα πριν τη ζώνη θραύσεως

Οι κυματισμοί προκαλούν κινήσεις - ρεύματα στα υγρά σωματίδια, οι οποίες είναι εντονότερες στα επιφανειακά στρώματα και αποσβένονται όσο αυξάνεται το βάθος. Κατά συνέπεια, στα βαθιά νερά ($d > L/2$) τα ρεύματα που παρατηρούνται είναι σχετικά ασθενή και επιφανειακά, αντίθετα στα ρηχά νερά και όσο πλησιάζουμε στην ακτογραμμή τα ρεύματα είναι ισχυρότερα. Πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές με μικρότερο βάθος πυθμένα, όπου οι τροχιές των σωματιδίων τείνουν να μην είναι κλειστές, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο εδάφιο, δημιουργείται ένα οριζόντιο κυματογενές ρεύμα κατά τη διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών. Η ένταση του συγκεκριμένου ρεύματος αυξάνει καθώς μειώνεται το σχετικό βάθος, φτάνοντας τη μέγιστη τιμή του στη ζώνη θραύσεως, όπου η επίδραση των ορίων του πυθμένα είναι μείζονος σημασίας.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, η εγκάρσια κατανομή των ρευμάτων έχει τριγωνική μορφή με μέγιστο στη γραμμή θραύσεως και μηδενική τιμή στην ακτογραμμή όπου θεωρείται αμελητέα η εγκάρσια συνιστώσα. Η παρουσία παράλληλης στην ακτογραμμή συνιστώσας, καθώς και οποιασδήποτε μεταβολής του ύψους κύματος και της θέσης της γραμμής θραύσεως, τροποποιεί το προφίλ της ταχύτητας του ρεύματος, μετατοπίζοντας το μέγιστο προς την ακτή. Η μεταβλητή V είναι η ταχύτητα του ρεύματος σε κάθε σημείο, η παράμετρος V_0 είναι η μέγιστη ταχύτητα του ρεύματος στην περίπτωση που η παράλληλη συνιστώσα θεωρηθεί αμελητέα και χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση του διαγράμματος, ενώ X είναι η απόσταση από την ακτή και X_b η απόσταση της ζώνης θραύσεως από την ακτή.



Σχήμα 2.3 Εγκάρσια κατανομή του ρεύματος κατά μήκος της ακτής (CEM, 2006)

2.3.3 Ρεύματα στη ζώνη θραύσεως και μετά τη θραύση

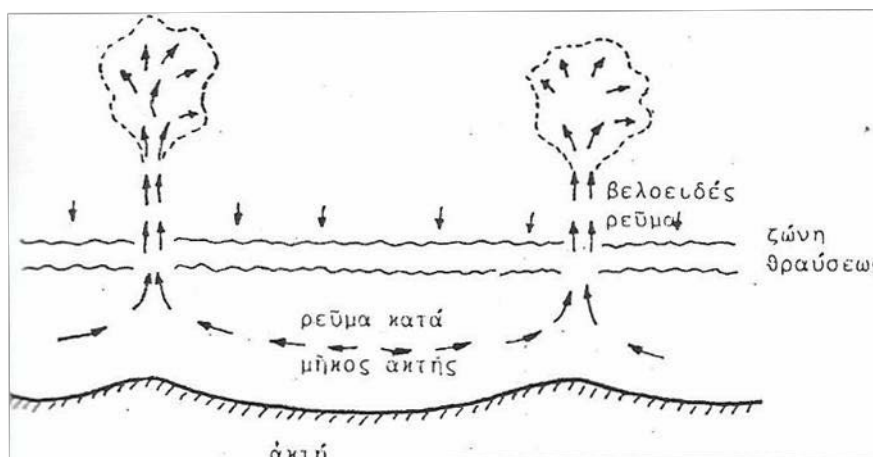
Η ζώνη θραύσεως είναι η πιο ενεργή περιοχή της παράκτιας ζώνης, καθώς μέσα σε αυτή αναπτύσσονται έντονα ρεύματα τόσο κατά μήκος της ακτής, όσο και κάθετα προς αυτή (βελοειδή). Επιπλέον, στην περιοχή αυτή λαμβάνει χώρα και το 80-90% της παράκτιας στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτογραμμής. Στην περίπτωση λοξής θραύσης των κυματισμών ένα μέρος της ενέργειας, συγκεκριμένα η κάθετη συνιστώσα, αναλύσκεται στην ανάπτυξη τύρβης, ενώ το υπόλοιπο – η παράλληλη συνιστώσα – παράγει ένα επίμηκες ρεύμα κατά μήκος της ακτής, το οποίο μεταφέρει ίζημα παράλληλα σε αυτή.

Η δημιουργία των ρευμάτων κμα οφείλεται στις υδραυλικές βαθμίδες που προκαλούνται από την ανομοιόμορφη κατανομή του ύψους κύματος στη ζώνη θραύσεως, αλλά και στην κλίση της γραμμής θραύσεως, καθώς όπως περιγράφηκε παραπάνω έτσι δημιουργείται η παράλληλη προς την ακτή συνιστώσα. Επίμηκη ρεύματα αναπτύσσονται περισσότερο κατά μήκος ευθύγραμμων ακτών. Η φορά αυτών των ρευμάτων καθορίζεται από τη μορφή της ακτογραμμής και τη διεύθυνση των προσπιπτόντων κυματισμών. Τυπικές τιμές για την ταχύτητα τέτοιων ρευμάτων είναι τα 0.3 – 1 m/s, αναλόγως τη φορά πνοής του ανέμου. Η ταχύτητα ενός τέτοιου ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση του βάθους θραύσεως d_b των κυματισμών, τη μείωση της περιόδου T , την αύξηση της γωνίας μεταξύ της γραμμής θραύσεως και της ακτής, και τέλος, με την αύξηση της κλίσης των πρανών της ακτής. Αν θεωρήσουμε ομοιόμορφη κλίση πυθμένα β , μικρή γωνία α μεταξύ μετώπου και ισοβαθών, ομοιόμορφη θραύση κυματισμών σε όλο το πλάτος της ζώνης θραύσεως και γραμμική θεωρία κυματισμών, η ταχύτητα του ρεύματος κμα μπορεί να υπολογισθεί από τον τύπο (Longuet-Higgins, 1970):

$$V = \frac{5\pi \tan \beta^*}{16 C_f} \kappa \sqrt{gd_b} \sin \alpha \cos \alpha \quad (2.1)$$

$$\text{όπου } \tan \beta^* = \frac{\tan \beta}{1 + \frac{3\kappa^2}{8}}$$

$\tan \beta^*$ είναι η κλίση του πυθμένα τροποποιημένη ώστε να συμπεριλαμβάνει την ανύψωση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω κυματισμών, C_f συντελεστής τριβής πυθμένα, $\kappa = 0.8$ σταθερά και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.



Σχήμα 2.4 Παράκτια ρεύματα που δρουν στην ακτή (Μουτζούρης, 2005)

2.4 Παράκτια ιζήματα

Οι ακτές και ο πυθμένας των θαλασσών μπορούν να χωριστούν γεωλογικά σε βραχώδεις και αμμώδεις/γαιώδεις. Οι μεν βραχώδεις ακτές είναι σχετικά σταθερές μορφολογικά και εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες γεωλογικών αιώνων, ενώ οι δε αμμώδεις, λόγω της σύστασής τους που περιλαμβάνει ελαφρύτερα κοκκώδη υλικά (άργιλος, άμμοι, κροκάλες), μεταβάλλονται μορφολογικά ευκολότερα και συχνότερα, ακόμα και κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων και έντονων καιρικών φαινομένων (θύελλες, τρικυμίες, κλπ.). Η μεταφορά του υλικού σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται κυρίως μέσω της δράσης των κυματισμών και των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής και είναι γνωστή με τον όρο στερεομεταφορά ιζήματος. Η γεωλογική σύσταση των ιζημάτων της παράκτιας ζώνης μπορεί να είναι χαλαζιακή, ασβεστολιθική, αργιλική ή οργανική, ανάλογα με τη γεωλογική τους ιστορία.

Τα περισσότερα ιζήματα που συναντώνται στην παράκτια ζώνη είναι προϊόντα αποσάθρωσης που προέρχονται από την ξηρά και καταλήγουν εκεί με τη βοήθεια φυσικών διεργασιών, όπως ο άνεμος, τα ποτάμια και κάθε είδους υδατορεύματα που εκβάλλουν στο θαλάσσιο χώρο, κατολισθήσεις, παγετώνες και άλλα έντονα καιρικά φαινόμενα. Επιπροσθέτως, στον πυθμένα των θαλασσών αποτίθενται ως ιζήματα κελύφη νεκρών θαλάσσιων οργανισμών και

γενικότερα οργανική ύλη, διαλυμένες ουσίες στο νερό ακόμη και σωματίδια διαλυμένων μετεωριτών. Έτσι, τα θαλάσσια ιζήματα με γνώμονα την προέλευσή τους κατατάσσονται σε:

- μηχανικά ή κλαστικά
- βιογενή ή οργανικά
- χημικά ή υδρογενή
- ηφαιστιογενή
- κοσμογενή.

Συν τοις άλλοις, όταν τα ιζήματα είναι προϊόν μεταφοράς μετά από διάβρωση ονομάζονται γαιογενή, ενώ, αντίθετα, όταν προέρχονται από καθίζηση στον πυθμένα και ιζηματογένεση ονομάζονται πελαγογενή. Τα γαιογενή ιζήματα είναι πιο χονδρόκοκκα και συσσωρεύονται σε φυσικές κοιλότητες της ακτογραμμής, ενώ τα πελαγογενή βρίσκονται ομοιόμορφα καταναμημένα στους πυθμένες των θαλασσών.

Η σημαντικότερη ταξινόμηση των γαιωδών ιζημάτων, που ενδιαφέρουν περισσότερο την επιστήμη της ακτομηχανικής, εφόσον είναι αυτά που μεταβάλλουν με την κίνησή τους τη μορφή μιας ακτής, γίνεται με βάση το μέγεθος των κόκκων τους και καλείται κοκκομετρική ανάλυση. Στον ακόλουθο Πίνακα 2.1 διακρίνονται τα ιζήματα σε πέντε κατηγορίες ως προς τη χαρακτηριστική διάμετρο των κόκκων τους.

Πίνακας 2.1 Κατηγοριοποίηση των ιζημάτων σύμφωνα με την κοκκομετρία τους (Μαυραντωνάκης, 2013)

Ονομασία	Χαρακ. Διάμετρος (mm)	Παράμετρος φ
Κροκάλες	250 - 60	(-8) - (-6)
Χάλικες	32 - 4	(-5) - (-2)
Άμμοι	2 - 0.10	1 - 4
Ιλύς	0.03 - 0.004	5 - 8
Άργιλος	0.002 - 0.0002	9 - 12

Στον παραπάνω πίνακα η παράμετρος φ ορίζεται κατά τον Wentworth ως ο λογάριθμος με βάση το 2 της χαρακτηριστικής διαμέτρου D του υλικού σε mm, δηλαδή:

$$\varphi = -\log_2 D \quad (2.2)$$

Άλλες σημαντικές παράμετροι των ιζημάτων που προσδιορίζονται από την αθροιστική καμπύλη συχνότητας (καμπύλη παρουσίας της κατανομής των κόκκων ενός ιζήματος) είναι:

- το μέσο μέγεθος των κόκκων M_φ , που αποτελεί τη διάμετρο με συχνότητα εμφάνισης 50%

$$M_\varphi = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \quad (2.3)$$

- η διαβάθμιση σ_φ , που είναι η απόκλιση από το μέσο μέγεθος (όσο μικρότερη η διαβάθμιση, τόσο πιο ομοιόμορφο το δείγμα)

$$\sigma_\varphi = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6,6} \quad (2.4)$$

- η λοξότητα SK, που φανερώνει το βαθμό ασυμμετρίας κατανομής των κόκκων

$$SK = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (2.5)$$

- η κύρτωση Ku , που εκφράζει την απόκλιση της κατανομής των κόκκων από την κανονική κατανομή (πλατύκυρτη καμπύλη σημαίνει πολύ καλά διαβαθμισμένο ίζημα)

$$Ku = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2,44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (2.6)$$

Από τις παραπάνω στατιστικές παραμέτρους αλλά και από το σχήμα, τη μορφή και τον προσανατολισμό των κόκκων μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη δυναμική του μέσου μεταφοράς των φερτών και του περιβάλλοντος απόθεσής τους (Κονισπολιάτης, 2009).

Γενικότερα, υπάρχουν και άλλες φυσικές παράμετροι που υπεισέρχονται στη μελέτη των ιζημάτων όπως είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η τάση αστοχίας, το πορώδες, η διαπερατότητα (ικανότητα του νερού να διηθείται διαμέσου του ιζήματος), η γωνία αποθέσεως (κλίση της επιφάνειας του κώνου κατάκλισης) και η ταχύτητα καθίζησης. Η τελευταία, μάλιστα, είναι ιδιαίτερα σημαντική στις λειτουργίες που συντελούνται στη παράκτια ζώνη και στο ρυθμό διάβρωσης των παράκτιων ιζημάτων. Όταν ένας κόκκος αφηθεί στο νερό βυθίζεται προς τον πυθμένα με μία επιτάχυνση, μέχρι τη στιγμή που η δύναμη πτώσης του εξισώνεται με τη δύναμη βαρύτητας ($F_b = mg$). Από εκείνη τη στιγμή αποκτά σταθερή ταχύτητα, η οποία ονομάζεται ταχύτητα καθίζησης W_f , και εξαρτάται από παράγοντες όπως το σχήμα, το μέγεθος και η πυκνότητα. Ένας γενικός τύπος υπολογισμού της ταχύτητας καθίζησης για μια σφαίρα που πέφτει σε ακίνητο ρευστό απείρου βάθους είναι ο ακόλουθος:

$$W_f = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{gD}{C_D} (\rho_s - \rho)} \quad (2.7)$$

όπου C_D ο συντελεστής συμπαράσυρσης, D η διάμετρος των κόκκων του ιζήματος, ρ_s και ρ η πυκνότητα του κόκκου και του ρευστού αντίστοιχα.

Table III-1-2 Sediment Particle Sizes						
ASTM (Unified) Classification ¹	U.S. Std. Sieve ²	Size in mm	Phi Size	Wentworth Classification ³		
Boulder	12 in. (300 mm)	4096.	-12.0	Boulder		
		1024.	-10.0			
Cobble	3 in. (75 mm)	256.	-8.0	Large Cobble		
		128.	-7.0			
		107.64	-6.75	Small Cobble		
		90.51	-6.5			
Coarse Gravel	3/4 in. (19 mm)	76.11	-6.25	Very Large Pebble		
		64.00	-6.0			
		53.82	-5.75			
		45.26	-5.5			
		38.05	-5.25	Large Pebble		
		32.00	-5.0			
		26.91	-4.75			
		22.63	-4.5			
Fine Gravel	4 (4.75 mm)	19.03	-4.25	Medium Pebble		
		16.00	-4.0			
		13.45	-3.75	Small Pebble		
		11.31	-3.5			
		9.51	-3.25			
		8.00	-3.0			
		6.73	-2.75			
		5.66	-2.5			
Coarse Sand	10 (2.0 mm)	4.76	-2.25	Granule		
		4.00	-2.0			
		3.36	-1.75			
		2.83	-1.5			
		2.38	-1.25	Very Coarse Sand		
		2.00	-1.0			
		1.68	-0.75			
		1.41	-0.5			
Medium Sand	40 (0.425 mm)	1.19	-0.25	Coarse Sand		
		1.00	0.0			
		0.84	0.25	Medium Sand		
		0.71	0.5			
		0.59	0.75			
		0.50	1.0			
		0.420	1.25			
		0.354	1.5			
Fine Sand	200 (0.075 mm)	0.297	1.75	Fine Sand		
		0.250	2.0			
		0.210	2.25	Very Fine Sand		
		0.177	2.5			
		0.149	2.75			
		0.125	3.0			
		0.105	3.25			
		0.088	3.5			
		Fine-grained Soil:	400	0.074	3.75	Coarse Silt
				0.0625	4.0	
0.0526	4.25			Medium Silt		
0.0442	4.5					
0.0372	4.75					
0.0312	5.0					
0.0156	6.0					
0.0078	7.0					
0.0039	8.0					
0.00195	9.0					
0.00098	10.0					
0.00049	11.0					
(PI = plasticity limit; LL = liquid limit)		0.00024	12.0	Colloids		
		0.00012	13.0			
		0.000061	14.0			

¹ ASTM Standard D 2487-92. This is the ASTM version of the Unified Soil Classification System. Both systems are similar (from ASTM (1994)).

² Note that British Standard, French, and German DIN mesh sizes and classifications are different.

³ Wentworth sizes (in mm) cited in Krumbein and Sloss (1963).

Πίνακας 2.2 Κατηγοριοποίηση ιζημάτων κατά ASTM και Wentworth (CEM, 2006)

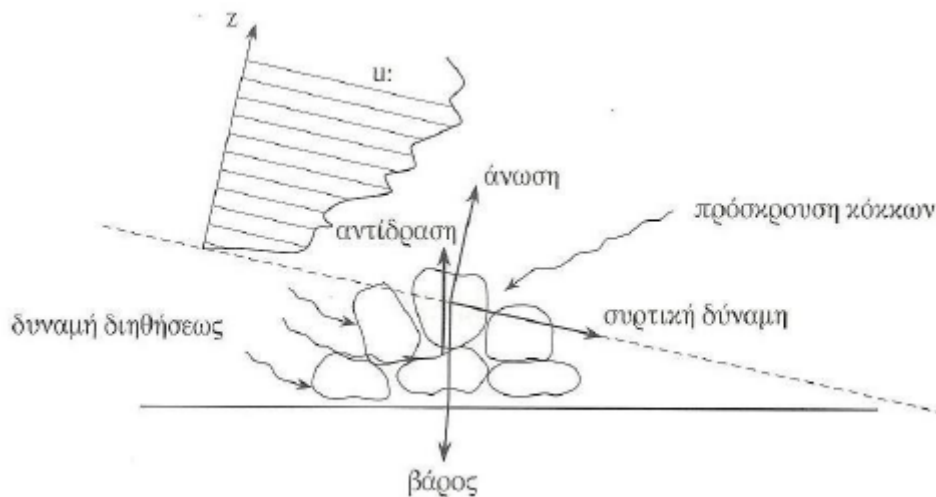
2.5 Κατώφλι κίνησης ιζήματος

Η κίνηση των παράκτιων ιζημάτων είναι αποτέλεσμα διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στον πυθμένα των θαλασσών, λόγω της κίνησης των υγρών σωματιδίων μέσω κυματισμών ή ρευμάτων. Η κίνηση των ιζημάτων συνεχίζεται έως ότου πάψουν να υπάρχουν τα γενεσιουργά της αίτια ή συναντηθούν παράκτια εμπόδια ή συνδυασμός των δύο. Σε φάση ηρεμίας τα ιζήματα ισορροπούν σε ορισμένες θέσεις. Η κατανομή τους και συνάμα η βαθυμετρία της περιοχής αντανakλούν το βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο κυματικό και ρευματικό κλίμα στην περιοχή. Το κλίμα αυτό αντιπροσωπεύει ένα σύνολο χαρακτηριστικών κυμάτων στα ανοιχτά. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο ευρύτερα επηρεάζονται τα ιζήματα. Σε χρονική κλίμακα μηνών ή έτους, τα ιζήματα και η βαθυμετρία βρίσκονται σε ισορροπία με τα ρεύματα και τα κύματα στην παράκτια ζώνη.

Το μεγαλύτερο ποσοστό στερεομεταφοράς στο παράκτιο περιβάλλον αποτελείται από την κίνηση ιζημάτων στη ζώνη θραύσεως. Οι ορθές και διατμητικές τάσεις στους κόκκους του ιζήματος λόγω κίνησης του νερού, οι αντιδράσεις στηρίξεως σε άλλους κόκκους, οι υδροδυναμικές υποπιέσεις λόγω διήθησης και οι δυνάμεις πρόσκρουσης από άλλους κόκκους δημιουργούν τις κατάλληλες δυναμικές συνθήκες για την αποκόλληση και την έναρξη κίνησης των επιφανειακών κόκκων του πυθμένα. Η κίνηση των κόκκων συνδέεται άμεσα με το πεδίο ταχυτήτων που επικρατεί στο υδάτινο στρώμα που βρίσκεται κοντά στον πυθμένα.

Αμέσως μετά την αποκόλλησή τους, η κίνηση των κόκκων του ιζήματος γίνεται με δύο πιθανούς τρόπους: (α) σε επαφή με τον πυθμένα (φορτίο πυθμένα), ή (β) σε αιώρηση μέσα στην υδάτινη μάζα (φορτίο αιωρήσεως). Η κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει ποιος από τους παραπάνω τρόπους θα πραγματοποιηθεί είναι ο λόγος W_f / u^* , δηλαδή ο λόγος της ταχύτητας καθίζησης προς την ταχύτητα τριβής $u^* = \sqrt{\tau_0 / \rho}$, όπου τ_0 η διατμητική τάση στον πυθμένα και ρ η πυκνότητα του νερού.

Η σημαντικότερη παράμετρος για την αποσταθεροποίηση των κόκκων είναι η διατμητική τάση στον πυθμένα, η οποία αποτελεί επαλληλία των τάσεων λόγω κυματισμών και ρευμάτων. Ο όρος κατώφλι κίνησης ιζήματος χρησιμοποιείται για την περιγραφή του σημείου στο οποίο αυτή η διατμητική τάση υπερβαίνει μία κρίσιμη τιμή, με αποτέλεσμα την έναρξη κίνησης του ιζήματος (Σχήμα 2.5). Η κρίσιμη τιμή εξαρτάται από την πυκνότητα του νερού, την ταχύτητα ροής, την πυκνότητα και την κοκκομετρία του ιζήματος.



Σχήμα 2.5 Κατώφλι κίνησης ιζήματος – Δυνάμεις που δρουν στους κόκκους (Κουτίτας, 1998)

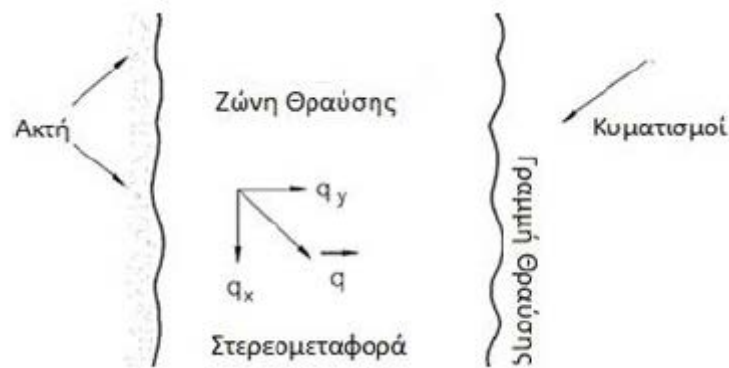
2.6 Μηχανισμοί παράκτιας στερεομεταφοράς

Τα ιζήματα μεταφέρονται υπό την αποσταθεροποιητική δράση των κυματισμών και τη μεταφορική δράση των ρευμάτων, διαδικασία η οποία ονομάζεται παράκτια στερεομεταφορά. Ανάλογα με το αίτιο που την προκαλεί, η στερεομεταφορά παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί πως η μεταφορά λεπτόκοκκων ιζημάτων είναι αποτέλεσμα της δράσης των παράκτιων ρευμάτων, ενώ, αντίθετα, η μετακίνηση πιο χονδρόκοκκων υλικών προκαλείται από τις διαταραχές των κυματισμών. Οι κυματισμοί φτάνουν στην ακτή υπό κάποια ορισμένη γωνία, που ανάλογα το μέγεθός της προκαλεί διαφορετικής έντασης στερεομεταφορά. Σύμφωνα με πειραματικές έρευνες, έχει παρατηρηθεί ότι κύματα με γωνία 45° ως προς την ακτή προκαλούν τη μέγιστη στερεομεταφορά και τις πιο έντονες επιπτώσεις στην ακτογραμμή.

Πολλές παράμετροι υπεισέρχονται στη διαδικασία στερεομεταφοράς και επηρεάζουν τις συνθήκες που αυτή πραγματοποιείται. Το πεδίο ταχυτήτων, η κοκκομετρία του ιζήματος, ο τύπος της ροής (στρωτή ή τυρβώδης), η ύπαρξη αμμοκυμάτων ή παλίρροιας, η βαθυμετρία και η κλίση του πυθμένα είναι μονάχα μερικές από αυτές. Για παράδειγμα, όταν επικρατούν μεγάλες ταχύτητες ροής στο νερό και το ίζημα έχει μικρή κοκκομετρία ευνοείται η κίνηση σε αιώρηση. Επίσης, σε περιοχές που δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από παλιρροϊκά φαινόμενα, όπως οι ελληνικές ακτές, το μεγαλύτερο ποσοστό στερεομεταφοράς λαμβάνει χώρα στο τμήμα μεταξύ της ακτογραμμής και της ζώνης θραύσεως κυματισμών, στην περιοχή των ρηχών νερών, ως φορτίο πυθμένα (Μέμος, 1992).

Εν γένει, η παράκτια στερεομεταφορά με οποιαδήποτε μορφή και να πραγματοποιείται χωρίζεται και, αντίστοιχα, μελετάται σε δύο βασικές συνιστώσες: την παράλληλη και την κάθετη στην ακτογραμμή. Για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής, την χρονική εξέλιξη της ακτογραμμής και τις μεταβολές στη μορφή του πυθμένα και στη συνολική βαθυμετρία της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιούνται συνήθως απλοποιημένες σχέσεις διότι το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο και δύσκολο να παρουσιαστεί με όλες τις παραμέτρους του στη γλώσσα των μαθηματικών. Συνεπώς, όταν ενδιαφέρει περισσότερο η μεταβολή της

ακτογραμμής και του πυθμένα κατά τη διάρκεια ενός κυματικού επεισοδίου, χρησιμοποιείται η εγκάρσια στερεομεταφορά. Αντίθετα, όταν μελετάται το συνολικό ισοζύγιο μεταφερόμενων ιζημάτων στον ευρύτερο χώρο μελέτης και σε μεγαλύτερη διάρκεια που περιλαμβάνει πολλά κυματικά επεισόδια (όπως κατά τη διάρκεια ενός έτους), πιο ουσιώδης είναι η στερεομεταφορά παράλληλα στην ακτή.



Σχήμα 2.6 Συνιστώσες στερεομεταφοράς στην ακτή: παράλληλη (q_x) και κάθετη (q_y) (CEM, 2006)

2.6.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

Η συνιστώσα της στερεομεταφοράς που είναι παράλληλη στην ακτογραμμή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το αν η ακτή θα υποστεί προσάμμωση ή διάβρωση ή παραμείνει σταθερή. Όπως περιγράφηκε και σε προηγούμενο εδάφιο, η κίνηση των ιζημάτων κατά μήκος της ακτής οφείλεται κατά κύριο λόγο στη λοξή θραύση των κυματισμών, η οποία σε μέγιστο βαθμό στη ζώνη θραύσεως ευνοεί την ανάπτυξη των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής, που με τη σειρά τους μεταφέρουν το ίζημα.

Για έναν παρατηρητή που κάθεται στην ακτή με πρόσωπο προς τα ανοικτά ορίζονται η στερεομεταφορά προς τα δεξιά Q_r και η στερεομεταφορά προς τα αριστερά Q_l αντίστοιχα. Το άθροισμα των δύο προαναφερθέντων τιμών ορίζεται αθροιστική στερεομεταφορά ή συνολική παροχή Q_g , ενώ η διαφορά τους κατά απόλυτη τιμή καθαρή στερεομεταφορά Q_n .

Η παροχή στερεομεταφοράς σε μία ακτή παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα με το χρόνο, κάτι που είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψιν στις εκάστοτε μελέτες. Σε πολλές ακτές έχει παρατηρηθεί σε ένα έτος καθαρή στερεομεταφορά προς μία κατεύθυνση, ενώ το αμέσως επόμενο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Γενικώς, η στερεομεταφορά παρουσιάζει μεγαλύτερη ένταση σε εποχές που επικρατούν ισχυρές κυματικές δράσεις.

Για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής ακολουθούνται πολλές μέθοδοι στην πράξη. Μπορούν να γίνουν επιτόπου μετρήσεις στο πεδίο μελέτης, χρήση στατιστικών δεδομένων από παλαιότερες χρονικές περιόδους στην ίδια περιοχή ή, αν δεν υπάρχουν δεδομένα για το συγκεκριμένο χώρο, μπορεί να γίνει προσαρμογή δεδομένων από κάποια γειτονική ακτή, για την οποία υπάρχει αναλυτικότερη πληροφόρηση. Τέλος, στη βιβλιογραφία εντοπίζονται πλήθος εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού, νομογραφημάτων,

αναλυτικών και υπολογιστικών μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη παράκτιων έργων.

Πολύ διαδεδομένα παγκοσμίως είναι τα μοντέλα ροής ενέργειας και ροής ορμής. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει και η μέθοδος CERC (Corps of Engineers Research Center), η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον στο σχεδιασμό και αφορά στερεοπαροχή που οφείλεται αποκλειστικά σε κυματογενή ρεύματα κμα και υπολογίζει το σύνολο φορτίου πυθμένα και φορτίου αιωρήσεως που διακινείται στις ζώνες θραύσεως και αποσβέσεως. Σύμφωνα με τη μέθοδο CERC ο ρυθμός στερεομεταφοράς παράλληλα στην ακτή υπολογίζεται ως:

$$Q_l = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g(1-n)} P_l \quad (2.8)$$

Όπου P_l η ροή ενέργειας ως:

$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H_b^2 C_{gb} \sin 2a_b \quad (2.9)$$

ή σύμφωνα με τη μέθοδο του Walton (1980 & 1982) που συνδυάζει δράση ρεύματος και κύματος

$$P_l = \frac{\rho g H_b W_b V_b C_f}{\frac{5\pi V}{2 V_0}} \quad (2.10)$$

Άλλες σχέσεις που υπολογίζουν την παράκτια στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτογραμμής είναι οι παρακάτω:

- $Q_l = 2,05 \cdot 10^6 H_0^{5/2} (\cos a_0)^{1/4} \sin 2a_0 \quad (\text{CEM, 2006}) \quad (2.11)$

- $Q_l = 3,60 \cdot 10^6 H_b^{5/2} \sin 2a_b \quad (\text{CEM, 2006}) \quad (2.12)$

- $Q_l = 1200 P_l \quad (\text{Κουτίτας, 1998}) \quad (2.13)$

- $Q_l = 6,40 \cdot 10^4 H_b^2 T_p^{1,5} \beta_b^{0,75} D_{50}^{-0,25} (\sin 2a_b)^{0,6} \quad (\text{Kamphuis, 1991}) \quad (2.14)$

- $\left. \begin{array}{l} 0 \leq \tan a_b \leq 1,23 \Rightarrow Q_l = Q_0 K_a \tan a_b \\ 1,23 < \tan a_b \Rightarrow Q_l = Q_0 \frac{K_b}{\tan a_b} \end{array} \right\} \quad (\text{Bakker \& Edelman, 1965}) \quad (2.15)$

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις είναι:

Q_i η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής σε $m^3/έτος$

P_i η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής σε $J/m/s$

K εμπειρικός αδιάστατος συντελεστής

ρ_s ($= 2650 \text{ kg/m}^3$) η μέση πυκνότητα ιζήματος

ρ ($= 1025 \text{ kg/m}^3$) η μέση πυκνότητα θαλασσινού νερού

g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) η επιτάχυνση της βαρύτητας

n ($\approx 0,40$) το πορώδες του ιζήματος

H_0 το ύψος κύματος στα βαθιά σε m

H_b το ύψος κύματος στη θραύση σε m

α_0 η γωνία διεύθυνσης των κυματισμών στα βαθιά

α_b η γωνία θραύσης

C_{gb} ($= \sqrt{gd_b}$) η ταχύτητα ομάδας κυματισμών στη θραύση σε m/s

d_b το βάθος θραύσεως σε m

W_b το εύρος της ζώνης θραύσεως σε m

V_b η ταχύτητα ρεύματος στη ζώνη θραύσεως

V_0 η θεωρητική ταχύτητα ρεύματος στη θραύση απουσία πλευρικής ανάμειξης

V η ταχύτητα ρεύματος

C_f ο συντελεστής τριβής του πυθμένα

T_p η περίοδος στην κορυφή του φάσματος σε s

β_b η κλίση του πυθμένα στη ζώνη θραύσεως

D_{50} η μέση διάμετρος των κόκκων του ιζήματος

K_a, K_b σταθερές

Όλες οι σχέσεις προϋποθέτουν άπειρη ποσότητα διαθέσιμου ιζήματος και άπειρο μήκος ακτογραμμής, συνεπώς πρόκειται για υπολογισμό δυνητικής στερεομεταφοράς και αποτελεί, στην ουσία, μία μέση τιμή στερεομεταφοράς στη ζώνη θραύσεως. Προφανώς αν πρέπει να υπολογισθεί το σύνολο της στερεομεταφοράς στη διάρκεια πολλών κυματικών επεισοδίων (H, α) μπορεί να υπολογισθεί ως αλγεβρικό άθροισμα κάθε ενός επεισοδίου ως $Q_t = \sum_i (\varepsilon_i f_i Q_{li})$, όπου $\varepsilon_i = \pm 1$ ανάλογα τη φορά κίνησης του ιζήματος, f_i η συχνότητα εμφάνισης του κάθε κυματικού επεισοδίου και Q_{li} η στερεοπαροχή που υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε επεισόδιο με κάποια από τις προαναφερθείσες σχέσεις.

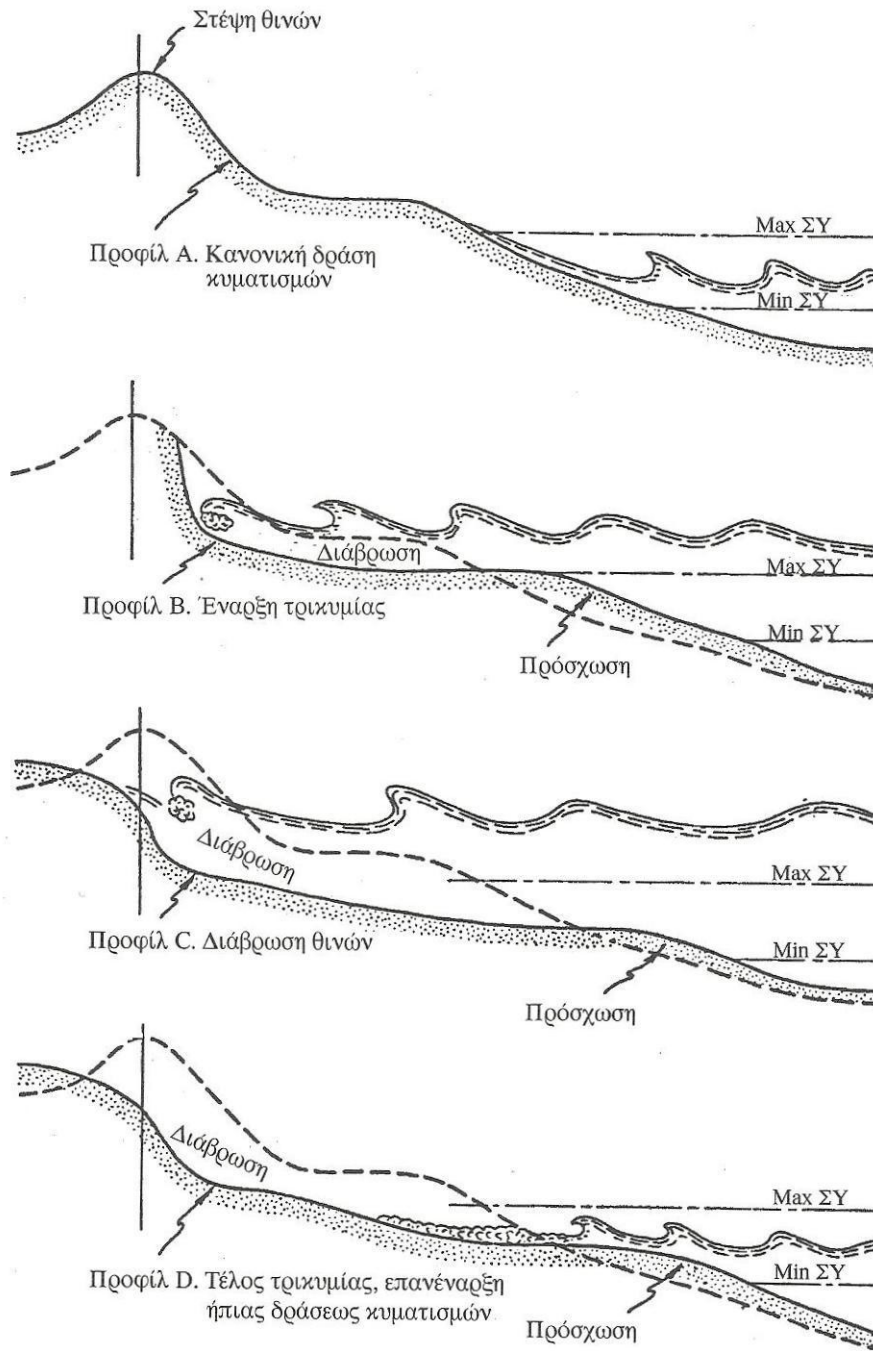
2.6.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή

Η εγκάρσια κίνηση των ιζημάτων οφείλεται κυρίως στους κυματισμούς, τα εγκάρσια κυματογενή ρεύματα, τους ανέμους και τις παλίρροιες. Η εγκάρσια στερεομεταφορά καθορίζει το προφίλ της ακτής, τη βαθυμετρία της και το ύψος των έξαλλων τμημάτων αυτής.

Υπό σταθερές κυματικές συνθήκες σε μία ακτή τείνει να δημιουργηθεί στον πυθμένα μία κλίση ισορροπίας, ώστε να μην υπάρχει εγκάρσια στερεομεταφορά προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτή η κλίση ισορροπίας αυξάνει όταν υπάρχει ίζημα χονδρότερης διαμέτρου, ενώ για συγκεκριμένο μέγεθος κόκκων μειώνεται όταν αυξάνεται η καμπυλότητα ($\gamma = H/L$) των κυματισμών που δρουν στην παράκτια ζώνη.

Η στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή, αντίθετα με την παράλληλη συνιστώσα, μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές στη μορφή της ακτογραμμής σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Σαν αποτέλεσμα, παρατηρείται σε κάθε ακτή η εμφάνιση δύο διαφορετικών εγκάρσιων προφίλ κατά τους χειμερινούς και τους θερινούς μήνες αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό κυματικό κλίμα που δέχεται η ακτή στις δύο περιόδους ενός έτους, καθώς κατά τη διάρκεια του χειμώνα αναπτύσσονται εντονότεροι κυματισμοί με μεγαλύτερη καμπυλότητα.

- Χειμερινό προφίλ: Οι ισχυροί κυματισμοί προκαλούν διάβρωση στο μέτωπο της ακτής και σε τμήμα του πυθμένα κοντά στη ζώνη θραύσεως προκαλώντας μετακίνηση ιζήματος, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός επιμήκους ύφαλου αναβαθμού παράλληλου στην ακτή. Το μήκος αυτού του αναβαθμού μπορεί να φτάσει τις τάξεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Σωστότερα, επειδή ο αναβαθμός διακόπτεται από τη ροή βελοειδών ρευμάτων αναφέρεται ως σύστημα διαδοχικών αναβαθμών. Είναι δυνατός ο σχηματισμός περισσότερων παράλληλων αναβαθμών. Γενικώς, ο αριθμός τους αυξάνει όσο μειώνεται η κλίση του πυθμένα και αυξάνεται η καμπυλότητα των κυματισμών. Η ύπαρξη του αναβαθμού προστατεύει κατά κάποιο τρόπο την ακτή από τη δράση των κυματισμών, δρώντας ως φίλτρο από το οποίο διέρχονται μόνο κύματα μικρότερης καμπυλότητας. Επιπροσθέτως, μετατοπίζεται η θραύση των κυματισμών προς τα ανοικτά εφόσον αλλάζει η βαθυμετρία της ακτής.
- Θερινό προφίλ: Σε περιόδους με ηπιότερα κύματα μικρότερης καμπυλότητας, μέρος των ιζημάτων του ύφαλου αναβαθμού μετατοπίζεται προς την ακτή, μειώνει την κλίση του πυθμένα και εξομαλύνει το ανάγλυφο. Έτσι συνήθως δημιουργείται, αντιστοίχως, ένας έξαλλος αναβαθμός στην ακτή εμπλουτίζοντάς τη με υλικό. Η ζώνη θραύσεως επανέρχεται σε ρηχότερα τμήματα.



Σχήμα 2.7 Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ (Κουτίτας, 1998)

Η διαφορά των δύο μηχανισμών που περιγράφηκαν έγκειται, προφανώς, από τη θέση της γραμμής θραύσεως, αλλά επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως το τοπικό κυματικό κλίμα, το εύρος της παλίρροιας και το μέγεθος της κοκκομετρίας του ιζήματος. Το σημαντικότερο αποτέλεσμα, όμως, του φαινομένου των εποχιακών προφίλ αποτελεί η διαφορά της κλίσης του πυθμένα και της θέσης του αναβαθμού που δημιουργούν τα ιζήματα.

Η εγκάρσια στερεομεταφορά σχετίζεται με πλήθος προβλημάτων στην παράκτια ζώνη όπως:

- η απόκριση της παραλίας και των αμμοθινών στις καταιγίδες

- η απόκριση της ακτογραμμής στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας
- οι εποχιακές μεταβολές της ακτής
- η ροή των ιζημάτων στη γειτονία παράκτιων τεχνικών έργων
- τα έργα αναπλήρωσης ακτής

Για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής κάθετα στην ακτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλήθος εμπειρικών σχέσεων. Η μέση εγκάρσια στερεομεταφορά για γραμμικά κύματα υπολογίζεται ως:

$$Q_v = \frac{E}{\rho C} \quad (2.16)$$

όπου E η ενέργεια του κύματος, ρ η πυκνότητα του νερού και C η ταχύτητα διάδοσης των κυματισμών.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια:

$$Q_v = c_2 \frac{1}{16\sqrt{2}} \frac{\rho\sqrt{g}}{\tan \varphi_\alpha} H_{rms}^3 d^{-1.5} \left\{ - \left(\frac{1+c_1\sqrt{2}}{2} \right) y + c_1 \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tan \beta}{\tan \varphi_\alpha} + R_{cu}^{ot} \right) \right\} \quad (2.17)$$

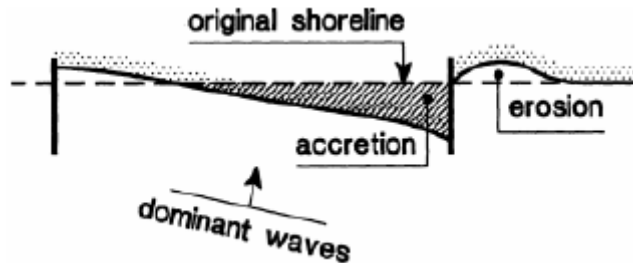
όπου c_1 , c_2 σταθερές, φ_α η γωνία αποθέσεως των ιζημάτων, β η κλίση του πυθμένα, ρ η πυκνότητα του νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, H_{rms} το μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος, d το βάθος του νερού και R_{cu}^{ot} παράμετρος που συνδέει το φορτίο του πυθμένα με τις διακυμάνσεις των ταχυτήτων μη γραμμικών κυμάτων.

2.7 Αλληλεπίδραση παράκτιου περιβάλλοντος – τεχνικών έργων

Το ισοζύγιο των φερτών υλών σε μία παράκτια ζώνη προσδίδει μία σχετική μορφοδυναμική ισορροπία στο περιβάλλον. Η τοποθέτηση όμως νέων παράκτιων έργων, όπως λιμενικές εγκαταστάσεις, έργα προστασίας της ακτής (πρόβολοι, κυματοθραύστες, κλπ.) και λοιπές παρεμβάσεις στον παράκτιο χώρο, διαταράσσουν την προϋπάρχουσα ισορροπία σε βαθμό ανάλογο του μεγέθους της παρεμβάσεως. Αποτέλεσμα τέτοιων έργων είναι η αναμόρφωση των κυματικών δεδομένων της περιοχής, καθώς πλέον συντελούνται φαινόμενα όπως η ανάκλαση, η περίθλαση, η θραύση λόγω ρήχωσης σε σημεία που δεν εμφανιζόταν προγενέστερα και αλλάζει, παράλληλα, η θέση της ζώνης θραύσεως. Οι συνθήκες στερεομεταφοράς μεταβάλλονται σημαντικά και διαμορφώνουν μια νέα βαθμμετρία στο παράκτιο περιβάλλον προκαλώντας εναπόθεση και διάβρωση σε διαφορετικά σημεία.

Συνήθως, στα ανάντη έργων – εμποδίων στην κατεύθυνση της ροής παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας ροής κατά μήκος της ακτής λόγω της παρουσίας του έργου και, κατά συνέπεια, στη μείωση της δυνατότητας μεταφοράς του ιζήματος. Σε μία μικρή ζώνη, αμέσως κατάντη του έργου, δημιουργείται εναπόθεση υλικού, διότι τα ιζήματα που διέρχονται γύρω από το έργο καθιζάνουν εξ αιτίας της απουσίας δυνάμεων παρασύρσεως. Σε μία ευρύτερη ζώνη, παρόλα αυτά, κατάντη του έργου θα υπάρξει εκτεταμένη διάβρωση, καθώς πλέον δεν υπάρχει ίζημα προς παράσυρση από το ρεύμα κατά

μήκος της ακτής και ταυτόχρονα έχει μειωθεί και η ταχύτητα ροής. Σημειώνεται ότι η μείωση της ταχύτητας ροής στα ανάντη εμποδίων, γενικότερα, μπορεί να οφείλεται είτε σε ανάκλαση και περίθλαση ενέργειας, όπως σε ένα μόλο ή κυματοθραύστη, είτε σε ανυπαρξία συνθηκών θραύσεως, λόγω απότομης αυξήσεως του βάρους του πυθμένα, όπως στην περίπτωση ενός βυθοκορημένου δίαυλου ναυσιπλοΐας.



Σχήμα 2.8 Αλληλεπίδραση ιζήματος – προβόλου (Leo C. Van Rijn, 2013)

Οι μεταβολές της ακτής που αναφέρθηκαν είναι μακροχρόνιες και αντανακλούν τις μέσες συνθήκες ροής σε ένα παράκτιο περιβάλλον που θα υποστεί ένα τεχνικό έργο. Βραχυπρόθεσμα, παρόλα αυτά, δεν αποκλείεται να εμφανιστούν μεταβολές αντίθετες με αυτές λόγω διαφορετικών στιγμιαίων συνθηκών παράκτιας ροής.

Σε κάθε διαφορετική κατασκευή παρουσιάζονται ανάλογες διαδικασίες που επηρεάζουν διαφορετικά τη στερεομεταφορά. Στην περίπτωση παράλληλων κυματοθραυστών στην ακτή, πραγματοποιείται αλλαγή της κατεύθυνσης και του ύψους κύματος λόγω περιθλάσεως. Έτσι, παγιδεύεται ποσότητα φερτού υλικού πίσω από το έργο, προκαλώντας προσάμμιση και την εμφάνιση tombolo που τείνει να ενώσει το έργο με την ακτή. Έργα κάθετα στην ακτογραμμή, όπως μόλοι και πρόβολοι, λειτουργούν ως παγίδες φερτών, λόγω στροβίλων αδρανειακής αποκολλήσεως από το άκρο τους που επηρεάζουν το παράκτιο ρεύμα. Τοίχοι αντιστήριξης κατασκευασμένοι παράλληλα στην ακτή, οι οποίοι βρίσκονται μέσα στη ζώνη αναρρίχησης, προκαλούν ανάκλαση του κύματος και διάβρωση στη βάση τους. Έτσι, παραμονεύει ο κίνδυνος υποσκαφής, εάν η θεμελίωση του τοίχου δεν έχει γίνει σε επαρκές βάθος.

Στην περίπτωση λιμένα ή μαρίνας, παρόμοια προβλήματα συναντώνται ανάντη (προσάμμιση), κατάντη (διάβρωση) αλλά και στις εισόδους του έργου συνήθως, εκεί που λόγω της απότομης μείωσης των ταχυτήτων ροής, παρουσιάζεται καθίζηση και εναπόθεση υλικού. Ιδιαίτερα στην είσοδο αλλά και μέσα στο χώρο ελιγμών της λιμενολεκάνης χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή από το μελετητή, εφόσον, αν το βάθος για τη βύθιση των σκαφών είναι οριακό, υπάρχει ο κίνδυνος με την πρόσθετη καθίζηση ιζήματος να καταστεί το έργο μη λειτουργικό για τον ελλιμενισμό των σκαφών.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η απόκριση της ακτής στην κατασκευή ενός έργου είναι μία παράμετρος, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στο σχεδιασμό. Ανεπιθύμητες μεταβολές της ακτής συνιστούν στην πραγματικότητα μορφές αστοχίας του έργου. Μπορεί να ειπωθεί με

σιγουριά, ότι τα παράκτια έργα που έχουν κατασκευασθεί, εμφάνισαν σε απόλυτους αριθμούς περισσότερες αστοχίες αυτής της μορφής παρά στατικές αστοχίες. Πάντως, η πρόβλεψη από τον μηχανικό πιθανών αστοχιών τέτοιου τύπου είναι αρκετές φορές παρακινδυνευμένη, καθώς ενέχει αρκετό ρίσκο. Αυτό οφείλεται τόσο στην ελλιπή γνώση της παράκτιας δίαιτας, όσο και στο στοχαστικό χαρακτήρα της. Μόνο σε περιοχές με σαφή και καθοριστικό χαρακτήρα παράκτιων ροών είναι δυνατή ως ένα βαθμό η πρόβλεψη αποθέσεως και εξελίξεως της ακτογραμμής. Ακόμη, όμως, και σε αυτές τις περιπτώσεις η ποσοτική πρόβλεψη διαβρώσεως με αναλυτικές μόνο μεθοδολογίες είναι αδύνατη. Μόνο η εξέταση του φαινομένου σε φυσικό ομοίωμα έχει πιθανότητες να μπορέσει να δώσει απόλυτα ασφαλή συμπεράσματα για το σχεδιασμό.

3. Έργα προστασίας της ακτογραμμής

3.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση των ακτών ενόχλησε τις κοινωνίες των ανθρώπων από τους αρχαίους χρόνους. Μέχρι όμως σχετικά πρόσφατα, η διάβρωση θεωρήθηκε σαν ένας ανεξέλεγκτος φυσικός μηχανισμός, στον οποίο ο άνθρωπος δεν θα μπορούσε να επέμβει. Από τον 18^ο αιώνα άρχισε ουσιαστικά η προσπάθεια ελέγχου της διαβρώσεως, πολύ συχνά χωρίς επιτυχία, δεδομένου ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός τέτοιου έργου, χωρίς να σημειωθεί οποιαδήποτε αστοχία, είναι από τα δυσκολότερα έργα ενός ακτομηχανικού. Η αστοχία αναφέρεται κυρίως στις προκαλούμενες παραμορφώσεις της παράκτιας ζώνης.

Η απαίτηση, πάραυτα, του ανθρώπου για σταθερό πλάτος ακτής οδήγησε στην ανάπτυξη νέων μεθόδων και μέσων αντιμετώπισης της διάβρωσης. Πλέον, έχουν υιοθετηθεί από τους εκάστοτε μελετητές διάφοροι τύποι έργων που περιορίζουν το φαινόμενο, καθένας με διαφορετικό μηχανισμό, ανάλογα τις ανάγκες της μελέτης και τις αντίστοιχες συνέπειες του έργου στην παράκτια ζώνη.

Τα παράκτια τεχνικά έργα για την προστασία έναντι διάβρωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, (α) τα συμβατικά και (β) τα ήπια, ανάλογα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνουν στον παράκτιο χώρο. Επιπροσθέτως, διακρίνονται ανάλογα με τον προσανατολισμό του διαμήκους άξονά τους και την απόστασή τους από την ακτογραμμή στα εξής:

- Θωράκιση του μετώπου της ακτής ή έργα στην ακτή
- Έργα (σχεδόν) παράλληλα και σε απόσταση από την ακτογραμμή, οι κυματοθραύστες
- Έργα (σχεδόν) κάθετα ή υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή, σε επαφή με αυτή, οι πρόβολοι
- Αναπλήρωση παράκτιας ζώνης με εναλλακτικές μεθόδους



Εικόνα 3.1 Έργα προστασίας ακτής κατά σειρά: κυματοθραύστες, θωράκιση με ογκόλιθους και πρόβολοι (www.panoramio.com)

Τα έργα θωράκισης της ακτής, οι έξαλλοι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι αποτελούν τις συμβατικές κατασκευές. Τα έργα αναπλήρωσης της ακτής με εναλλακτικές μεθόδους, όπως και κάθε είδους ύφαλη κατασκευή (ύφαλοι κυματοθραύστες, αναβαθμοί, κλπ.), χαρακτηρίζονται ως ήπιες μορφές έργων προστασίας, αφού έχουν εμφανώς λιγότερες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

Η σωστή επιλογή και ο σχεδιασμός των έργων παράκτιας προστασίας προκύπτει ως γινόμενο πολλών φυσικών και ανθρωπογενών παραμέτρων, όπως ο μηχανισμός διάβρωσης, το υδροδυναμικό και κυματικό κλίμα της παράκτιας ζώνης, τα δεδομένα του διατιθέμενου ιζήματος, απαιτήσεις στατικότητας και λειτουργικότητας του έργου, καθώς επίσης και από περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Στο τέλος λοιπόν, οι αποφάσεις που καλείται να λάβει ο εκάστοτε μελετητής είναι φανερό πως ενέχουν αρκετό ρίσκο και απαιτούν μεγάλη εμπειρία, σωστό «διάβασμα» της παράκτιας περιοχής και ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή μελέτη για την αποφυγή ανεπιθύμητων αστοχιών στη διάρκεια ζωής του έργου.

3.2 Κυματοθραύστες

3.2.1 Μηχανισμός λειτουργίας και κατηγορίες κυματοθραυστών

Οι κυματοθραύστες είναι επιμήκη έργα που συνήθως τοποθετούνται παράλληλα ή με μικρή κλίση ως προς την ακτογραμμή και σε κάποια απόσταση από αυτή. Σκοπός τους είναι η προστασία της ακτογραμμής από τη διάβρωση και, γενικότερα, τη δράση των κυματισμών. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε ακτές λεπτόκοκκου ιζήματος με ανοιχτό μέτωπο στο πέλαγος, για να αποφευχθεί η διάβρωση και να εξασφαλιστεί το πλάτος της ακτής. Συχνά λειτουργούν και σε συνδυασμό με λιμενικά έργα, προστατεύοντας τις εγκαταστάσεις και επιτρέποντας ηρεμία στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης για την ασφαλή κίνηση, αγκυροβόληση και φορτοεκφόρτωση των πλοίων. Επίσης, αρκετές φορές χρησιμοποιούνται για την προστασία εγκαταστάσεων υδροληψίας ενεργειακών σταθμών ή, ακόμη, και για την προστασία περιοχών που κινδυνεύουν από προβλήματα παλίρροιας ή κυμάτων tsunami. Το μέτωπο του έργου που προσβάλλεται από τα ισχυρότερα κύματα του πελάγους λέγεται εξωτερικό ή προσήνεμο, ενώ το μέτωπο που βλέπει προς την ακτογραμμή λέγεται εσωτερικό ή υπήνεμο.

Η δράση των κυματισμών μειώνεται μέσω συνδυασμού θραύσης τους στο πρηνές του έργου, ανάκλασης και διάχυσης της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας κυματισμός προσπίπτει στο προσήνεμο μέτωπο ενός κυματοθραύστη, ένα μέρος της ενέργειας του κύματος ανακλάται δημιουργώντας ένα επιστρέφον κύμα στα ανοιχτά. Επίσης, ποσοστά ενέργειας θα καταστραφούν σε συγκρούσεις μεταξύ των μορίων, καθώς ακολουθούν διαφορετικές τροχιές γύρω από τα υλικά κατασκευής του κυματοθραύστη και συναντιούνται, και σε τριβές μορίων πάνω στην επιφάνεια του πρηνούς του κυματοθραύστη. Ένα άλλο μέρος της ενέργειας αποθηκεύεται στη μάζα του νερού που μπαίνει μέσα στα κενά του σώματος του κυματοθραύστη και διαβιβάζεται στην υπήνεμη πλευρά. Τέλος, το υπόλοιπο ποσοστό θα αποθηκευθεί στη μάζα του κύματος που θα υπερπηδήσει τον κυματοθραύστη (Δασκαλάκης, 2009).

Όλη η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω έχει σαν αποτέλεσμα στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη να δημιουργείται ηπιότερο κυματικό κλίμα, που, με τη σειρά του, μειώνει την ικανότητα κίνησης του ιζήματος πίσω από τον κυματοθραύστη. Προφανώς, η μετάδοση της κυματικής ενέργειας, η μεταφορά μάζας νερού και η μείωση στερεομεταφοράς συνδέονται με μεγέθη όπως το ύψος στέψης του κυματοθραύστη, το πλάτος του, το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού, τον τύπο κατασκευής του έργου, την κλίση του πρανούς του μετώπου και το υλικό κατασκευής των διαφόρων στρώσεων.

Υπάρχουν πολλές κατηγορίες κυματοθραυστών, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι οι ακόλουθες:

- Αποσπασμένοι τυπικοί κυματοθραύστες συμπαγούς διατομής.
- Ιαπωνικού τύπου κυματοθραύστες: πρόκειται για έργα με προσήνεμο κεκλιμένο πρανές και κατακόρυφο υπήνεμο μέτωπο. Συνήθως κατασκευάζονται από προκατασκευασμένα κιβώτια (caissons).
- Πλωτοί κυματοθραύστες: πρόκειται για έργα που δεν εδράζονται στον πυθμένα αλλά επιπλέουν και συγκρατούνται με σύρματα ή σχοινιά στη θέση κατασκευής. Λόγω της μικρής τους αποτελεσματικότητας, χρησιμοποιούνται συνήθως ως προσωρινά έργα προστασίας.
- Κυματοθραύστες πάνω σε πασσάλους: ελαφρές κατασκευές χρήσιμες σε περιπτώσεις χαλαρού πυθμένα.
- Διάτρητοι κυματοθραύστες: σε αυτόν τον τύπο μειώνεται η υδροδυναμική φόρτιση του έργου, με οπές που οδηγούν τη μάζα του νερού σε θάλαμο εκτόνωσης με πλήρες το υπήνεμο κατακόρυφο μέτωπο.
- Ύφαλοι ή βυθισμένοι κυματοθραύστες: έργα με στέψη κάτω από τη μέση στάθμη ηρεμίας.

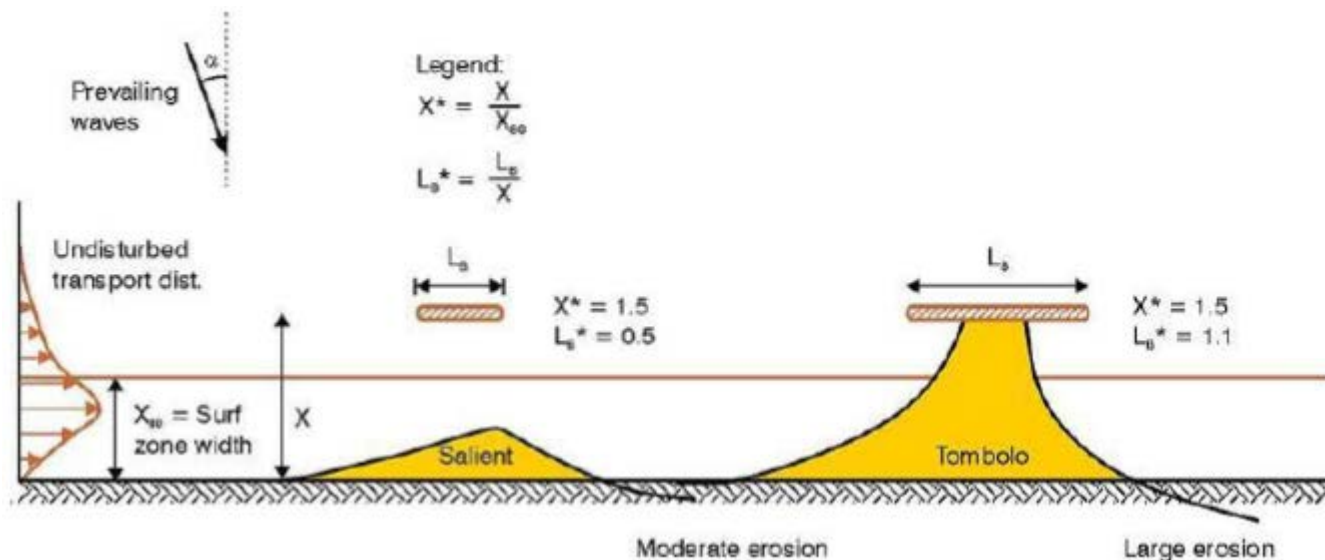
3.2.2 Διαστασιολόγηση και χωροθέτηση κυματοθραυστών

Οι παράμετροι που καθορίζουν τις επιπτώσεις στην ακτογραμμή και βάσει των οποίων γίνεται ο σχεδιασμός του έργου είναι (α) ο τύπος του κυματοθραύστη που θα κατασκευασθεί, (β) η απόσταση του από την ακτογραμμή και η θέση σε σχέση με τη ζώνη θραύσεως, (γ) το μήκος και ο προσανατολισμός του, (δ) αν πρόκειται για μεμονωμένο κυματοθραύστη ή σύστημα παράλληλων κατασκευών και (ε) το υλικό κατασκευής και οι λεπτομέρειες διαμόρφωσης του έργου.

Στην περίπτωση αποσπασμένων κυματοθραυστών που κατασκευάζονται για την προστασία της ακτής από τη διάβρωση, στην πλάτη του έργου παρουσιάζεται συσσώρευση ιζήματος καθώς μειώνεται η ταχύτητα ροής και καθιζάνει το υλικό, λόγω της ηπιότερης κυματικής δράσης που προκαλεί ο κυματοθραύστης. Έτσι, παρουσιάζονται εν γένει δύο τυπικοί σχηματισμοί ιζήματος:

- Salient, όπου σχηματίζονται προεξοχές κωνοειδούς μορφής στη σκιά των έργων στην ακτή σε μορφή καμπάνας

- Tombolo, όπου το συσσωρευμένο ιζήμα δημιουργεί ένα τμήμα ξηράς αμμόδους σύστασης στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, η οποία τον συνδέει ουσιαστικά με την ακτή και διακόπτει τη ροή νερού πίσω από το έργο



Σχήμα 3.1 Σχηματισμοί salient και tombolo (Magnor, 2013)

Οι παράγοντες που καθορίζουν ποιος σχηματισμός θα δημιουργηθεί είναι: (α) το μήκος στέψης του κυματοθραύστη L_s , (β) η απόστασή του από την ακτογραμμή Y , (γ) η απόσταση ανάμεσα σε γειτονικούς κυματοθραύστες L_g και (δ) το μέσο βάθος στη θέση του έργου κάτω από τη στάθμη ηρεμίας d_s . Συμπερασματικά, ο σχηματισμός salient εμφανίζεται όταν το έργο είναι:

- αρκετά απομακρυσμένο από την ακτή
- μικρότερου μήκους σε σχέση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κυματισμού
- σχετικά διαπερατό (χαμηλή στέψη ή μεγάλα κενά που επιτρέπουν μικρής ποσότητας στερεομεταφορά)

Αντιθέτως, ο σχηματισμός tombolo υπερισχύει όταν το έργο:

- είναι τοποθετημένο πολύ κοντά στην ακτή
- έχει μήκος μεγαλύτερο του μήκους κύματος
- είναι αδιαπέρατο (υψηλή στέψη, αδιαπέρατο υλικό κατασκευής)

Γενικώς, ο σχηματισμός salient προτιμάται, καθώς επιτρέπει την κίνηση του ιζήματος κατά μήκος της ακτής και η παράλληλη συνιστώσα της στερεομεταφοράς συνεχίζεται στα κατάντη τμήματα. Παράλληλα, ανανεώνεται περισσότερο το νερό στην υπήνεμη πλευρά του έργου, όσο η δράση των κυματισμών και των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής εμποδίζει την ένωση αυτής με τον κυματοθραύστη (δεν δημιουργείται tombolo). Αντίστροφα, όταν σχηματίζεται tombolo σε συνδυασμό με τον κυματοθραύστη, λειτουργούν σαν έναν πρόβολο σε σχήμα T,

ανακόπτοντας την κατά μήκος στερεομεταφορά, προωθώντας την προς τα ανοιχτά και δημιουργώντας βελοειδή ρεύματα. Επίσης, η διακοπή της ροής κατά μήκος της ακτής έχει ως συνέπεια τη διάβρωση στα κατάντη. Ο σχηματισμός tombolo μπορεί να επιτραπεί, εάν η διάβρωση κατάντη του έργου δεν απαιτεί στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής, ή απαιτείται η παραλία πίσω από το έργο να αξιοποιηθεί ως τουριστικό θέρετρο. Σε κάθε περίπτωση, εάν οι κυματοθραύστες είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να ευνοείται ο σχηματισμός tombolo, πρέπει να ληφθούν υπόψιν μέτρα ασφαλείας καθότι θα υπάρχει πλήρης πρόσβαση του κοινού στην κατασκευή.



Εικόνα 3.2 Χαρακτηριστικοί σχηματισμοί salient και tombolo πίσω από κυματοθραύστες στο Sea Palling του Norfolk της Μ. Βρετανίας (www.southwestcoastalgroup.org, www.hydrosurveys.co.uk, www6.plymouth.ac.uk)

Για τις παραμέτρους που καθορίζουν το σχηματισμό που θα δημιουργηθεί, σύμφωνα με το CEM, 2008, ισχύουν:

- tombolo: (α) για μεμονωμένο κυματοθραύστη

$$L_s / Y = 1,5 \div 2 \quad (3.1)$$

- (β) για σύστημα παράλληλων κυματοθραυστών

$$L_s / Y = 1,5 \quad (3.2)$$

$$\text{και } L \leq L_g \leq L_s \quad (3.3)$$

- salient: είτε για σύστημα κυματοθραυστών είτε για μεμονωμένη κατασκευή

$$L_s / Y = 0,5 \div 0,67 \quad (3.4)$$

όπου $L = T\sqrt{gh}$ το μήκος κύματος στη θέση του έργου, T η περίοδος του κύματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και h το τοπικό βάθος στο χώρο της κατασκευής.

Στις περιπτώσεις που το σύστημα παράλληλων κυματοθραυστών εκτείνεται σε μεγάλη σχετικά απόσταση στον παράκτιο χώρο, συστήνεται στο σχεδιασμό να λαμβάνεται

$$L_s / Y = 0,125 \quad (3.5)$$

Γενικότερα πάντως, λαμβάνεται ικανή συνθήκη για σχηματισμό tombolo $L_s / Y > 1$, ενώ για salient $L_s / Y < 1$.

Όσον αφορά ύφαλους κυματοθραύστες, οι παραπάνω σχέσεις μεταλλάσσονται λόγω της βυθισμένης στέψης, χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή $(1 - K_t)$, σύμφωνα με τον Pilarczyk (2003), ως εξής:

$$\text{tombolo: } L_s / Y > (1 \div 1,5) / (1 - K_t) \quad (3.6)$$

$$\text{salient για μεμονωμένο: } L_s / Y < 1 / (1 - K_t) \quad (3.7)$$

$$\text{salient για σύστημα: } L_g Y / L_s^2 > 0,5 \cdot (1 - K_t) \quad (3.8)$$

$$\text{και } L \leq L_g \leq 0,8 L_s \quad (3.9)$$

Η παράμετρος K_t που χρησιμοποιείται ονομάζεται συντελεστής μετάδοσης και ορίζεται ως $K_t = H' / H$, όπου H το ύψος του προσπίπτοντος κύματος στο προσήνεμο μέτωπο του έργου και H' το ύψος του μεταδιδόμενου κυματισμού στην υπήνεμη πλευρά. Ο λόγος K_t ορίζεται για ετήσιες κυματικές συνθήκες και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, όπου η τιμή μηδέν υπονοεί μηδενική μετάδοση κυματισμού (αδιαπέρατος, έξαλλος κυματοθραύστης), ενώ η τιμή 1 σημαίνει απουσία κυματοθραύστη και ολική μετάδοση κυματισμού. Στους παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό μετάδοσης του κυματισμού περιλαμβάνονται: το ύψος και το πλάτος στέψης, η κλίση έργου, ο πυρήνας και το υλικό θωράκισης, η παλίρροια και η στάθμη σχεδιασμού, το ύψος και η περίοδος κύματος. Όσο η μετάδοση των κυματισμών αυξάνεται, η επίδραση της περίθλασης μειώνεται, έτσι το μέγεθος της συσσώρευσης της άμμου μειώνεται

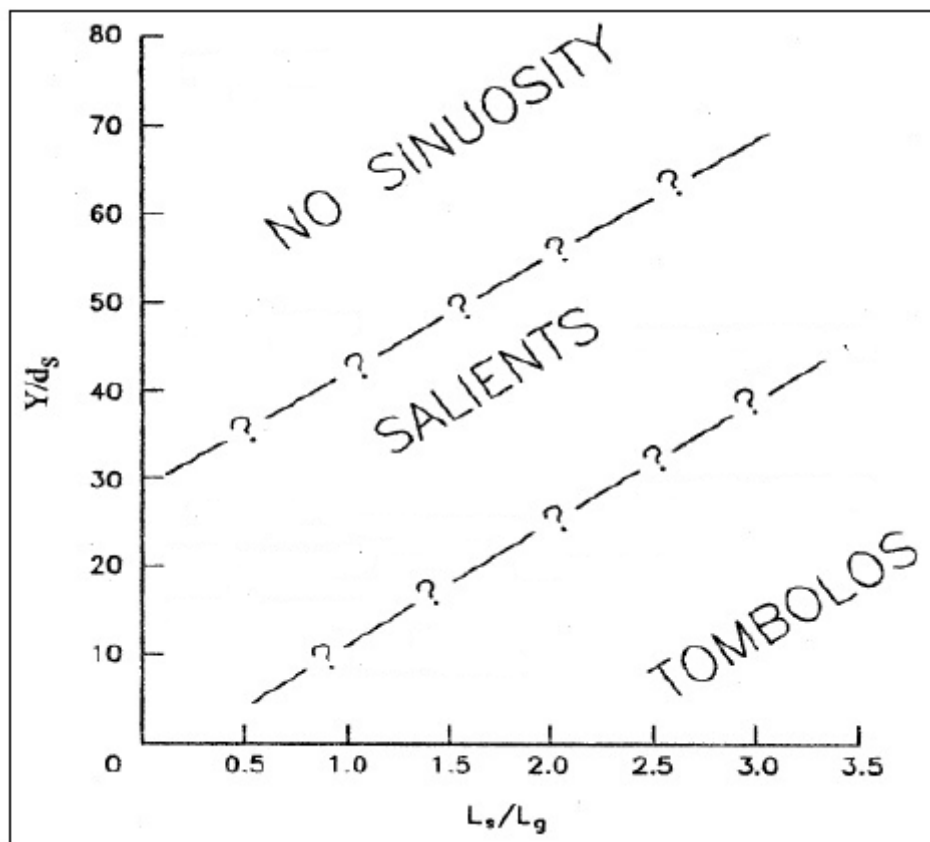
καθώς τα ρεύματα λόγω περίθλασης που μετακινούν το ίζημα στην σκιά του έργου αποδυναμώνονται.

Μία σχέση υπολογισμού του λόγου μετάδοσης είναι η εξής:

$$K_t = -\frac{0,4R_c}{H_i} + \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0,31} \cdot (1 - e^{-0,5\xi})C \quad (3.10)$$

όπου $\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_i/L_0}}$, R_c το ύψος στέψης του έργου, B το πλάτος στέψης, C αριθμητικός

συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν τη διαπερατότητα του έργου ($C = 0,64$ για διαπερατά έργα και $C = 0,80$ για αδιαπέρατα), L_0 το μήκος κύματος στα ανοιχτά και θ η γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 3.2 Συσχέτιση των αδιάστατων λόγων L_s/L_g και Y/d_s για κάθε σχηματισμό (CEM, 2008)

Οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στις ακτές όπου το παλιρροιακό εύρος είναι αμελητέο ή μικρό. Προσφέρουν σημαντικά οφέλη, συγκριτικά με τους προβόλους, όταν εφαρμόζονται σε ευρείες παράκτιες περιοχές με λεπτόκοκκο ίζημα, όπου ο κυρίαρχος μηχανισμός στερεομεταφοράς είναι κάθετος στην ακτογραμμή.

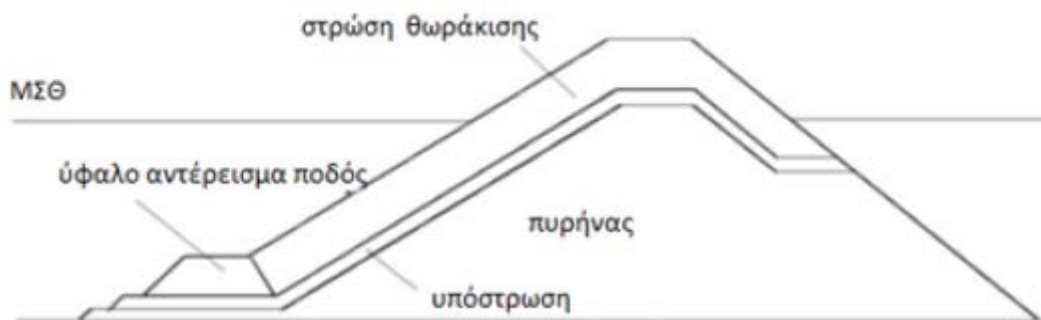
Το ενδιάμεσο κενό δύο κυματοθραυστών, σε ένα σύστημα παράλληλων έργων, είναι συνάρτηση της απαιτούμενης μείωσης της ενέργειας του παράκτιου κύματος, ώστε να προστατευθεί το μέτωπο της ακτής ή να εμποδιστεί η απώλεια υλικού. Η μείωση της

ενέργειας δεν επηρεάζεται μόνο από το κενό αλλά και από το ύψος στέψης του κυματοθραύστη. Η παράταξη σε σειρά των κυματοθραυστών δεν πρέπει απαραίτητα να είναι παράλληλα στην τοπική ακτογραμμή, ειδικά αν υπάρχει μια κυρίαρχη κατεύθυνση κυματισμού ή περιορισμένο εύρος κυματικών κατευθύνσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι προτιμότερο τα έργα να τοποθετηθούν παράλληλα στο μέτωπο των κυμάτων, ώστε να αυξάνεται η αποτελεσματικότητά τους.

3.2.3 Σχεδιασμός διατομής κυματοθραυστών

Η διατομή των κυματοθραυστών διακρίνεται σε δύο κατηγορίες σε σχέση με την κλίση του προσήνεμου μετώπου τους: (α) κυματοθραύστες με κεκλιμένη προσήνεμη παρειά και (β) με κατακόρυφο μέτωπο. Οι κυματοθραύστες με κεκλιμένη παρειά στις περισσότερες περιπτώσεις είναι κατασκευές με πρανή διαμορφωμένα με φυσικούς ή τεχνητούς ογκολίθους, με ή χωρίς έργα υπερπήδησης, ενώ έργα με κατακόρυφο μέτωπο είναι συνήθως κατασκευασμένα από σκυροδετημένα κιβώτια με άμμο ως υλικό πληρώσεως (caissons) ή με πασσαλοσανίδες.

ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗΣ ΜΕ ΠΡΑΝΗ



Σχήμα 3.3 Τυπική διατομή συμβατικού αποσπασμένου κυματοθραύστη με διαχωρισμό των βασικών στρώσεων επένδυσης (CEM, 2006)

Οι κυματοθραύστες με κεκλιμένα πρανή είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος κυματοθραυστών (rubble-mound breakwaters). Τα πρανή αποτελούνται από λιθορριπές με συνεχώς αυξανόμενη διάμετρο και βάρος λίθων από τον πυρήνα προς την επιφάνεια. Στην πιο απλή τους μορφή είναι ανάχωμα από ογκολίθους. Μια συμβατική διατομή με κεκλιμένες παρειές συνίσταται από έναν πυρήνα με λεπτόκοκκο υλικό καλυμμένο από μεγαλύτερους ογκολίθους, σχηματίζοντας έτσι μια στρώση θωράκισης. Για να αποτραπεί η απόπλυση του λεπτόκοκκου υλικού μέσω της στρώσης θωράκισης, προβλέπεται να υπάρχουν ενδιάμεσες στρώσεις με μικρότερο μέγεθος ογκολίθων από τις στρώσεις θωράκισης, οι οποίες λειτουργούν ως φίλτρα. Η στρώση κάτω από τη στρώση θωράκισης ονομάζεται υπόστρωση. Στο χαμηλότερο κομμάτι της στρώσης θωράκισης και μπροστά στον πόδα του προσήνεμου μετώπου του έργου, συνήθως διαμορφώνεται ένα μικρού πλάτους οριζόντιο κατάστρωμα από λίθους της δεύτερης στρώσης (ύφαλο αντέρεισμα ποδός – toe berm), για να στηρίζει τη θωράκιση έναντι

ολίσθησης. Εκτός από τους φυσικούς ογκολίθους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τεχνητοί ογκολίθοι, συνήθως από άοπλο σκυρόδεμα που προκατασκευάζονται σε τυποποιημένα σχήματα. Χρησιμοποιούνται για έργα σε περιοχές με έντονες κυματικές συνθήκες, όταν απαιτείται μεγαλύτερο βάρος ογκολίθων από αυτό που διατίθεται από το λατομείο. Τέλος, σημειώνεται ότι οι ύφαλοι κυματοθραύστες προτιμάται να κατασκευάζονται με κεκλιμένα πρηνή, παρά με κατακόρυφο μέτωπο.

Όσον αφορά τα έργα με κατακόρυφο μέτωπο στην προσήνεμη πλευρά, η βασική διαφορά από τα έργα με πρηνές έγκειται στην υδροδυναμική της κατασκευής. Οι κυματισμοί ανακλώνται στο κατακόρυφο μέτωπο, ενώ στο πρηνές θραύονται και απορροφάται η ενέργειά τους. Η ανάκλαση δημιουργεί, ως γνωστόν, στάσιμο κυματισμό και υψηλές ταχύτητες εμπρός από το κατακόρυφο μέτωπο, με συνέπεια τον αυξημένο κίνδυνο υποσκαφής του πόδα του έργου. Αυτός ο κίνδυνος απαιτεί σοβαρότερα μέτρα για την ασφαλή θεμελίωση του έργου, επειδή τυχόν υποχώρησή του συνεπάγεται ζημιές που δεν επιδιορθώνονται τόσο εύκολα όσο στα έργα με πρηνή. Ένας πρόσθετος λόγος είναι πως τα συμπαγή έργα κατακόρυφου μετώπου, λόγω του μειωμένου πλάτους και του αυξημένου φαινόμενου βάρους τους, μεταφέρουν μεγαλύτερες τάσεις στο έδαφος θεμελίωσης από τα πρίσματα λιθορριπών. Μία ακόμη παράμετρος είναι ότι το κόστος του έργου με κατακόρυφο μέτωπο αυξάνει δυσανάλογα με το βάθος. Έτσι, πολλές φορές προκρίνεται η λύση της μικτής διατομής, η οποία περιλαμβάνει πρίσμα λιθορριπών επάνω στο οποίο εδράζεται το έργο με κατακόρυφο μέτωπο. Στις μικτές διατομές χρειάζεται να δίδεται ικανό βάθος στο κατακόρυφο μέτωπο, πάνω από 2 H (H το ύψος κύματος), ώστε να αποφεύγεται η πρόκληση θραύσης των επερχόμενων κυματισμών λόγω ρήγωσης.

Η ευστάθεια των λίθων θωράκισης απέναντι στις φορτίσεις των κυμάτων διασφαλίζεται στην πράξη με χρήση ημιεμπειρικών σχέσεων που δίνουν το βάρος των ογκολίθων. Από την πλειάδα των δημοσιευμένων τύπων χρησιμοποιείται συνήθως ο τύπος του Hudson που αναπτύχθηκε μετά από εργαστηριακή έρευνα στο Waterways Experiment Station των Η.Π.Α. κατά τη δεκαετία του 1950 και έχει τύχει προκαταρκτικής επιβεβαίωσης σε φυσική κλίμακα. Η σχέση του Hudson που δίνει το βάρος ογκολίθων είναι η εξής:

$$B = \frac{\gamma H^3}{K_D (\delta - 1)^3 \cot \theta} \quad (3.11)$$

όπου

B το απαιτούμενο μέσο βάρος του ογκολίθου στη στρώση θωράκισης, με περίπου 50% του πλήθους των λίθων να ζυγίζουν πάνω από B

γ ειδικό βάρος του πετρώματος των ογκολίθων

H ύψος κύματος σχεδιασμού

K_D συντελεστής ευστάθειας, που εξαρτάται κυρίως από το σχήμα των ογκολίθων και τη δυνατότητα αλληλοεμπλοκής των μονάδων θωράκισης, το θραυόμενο ή μη των κυματισμών και τη θέση της διατομής στο ακρομόλιο ή τον κορμό του έργου. Χαρακτηριστικές τιμές του K_D δίνονται στον Πίνακα 3.1

δ ο λόγος των ειδικών βαρών γ/γ_v

γ_v το ειδικό βάρος νερού στην περιοχή του έργου

θ η γωνία του πρανούς ως προς την οριζόντιο. Τιμές της $\cot\theta$ μικρότερες του 1,5 δεν συνιστώνται, ενώ ελάχιστες τιμές γύρω στο 2 είναι καταλληλότερες για προσήνεμα πρανή σοβαρών έργων

Πίνακας 3.1 Τιμές συντελεστή ευστάθειας K_D (Μέμος, 2008)

Θωράκιση	n*	Τοποθέτηση	Κορμός έργου **		Ακρομώλιο		
			(1)	(2)	(1)	(2)	cotθ
Φυσικοί ογκόλιθοι							
Λείοι καμπύλης μορφής	2	Τυχαία	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 - 3.0
Λείοι καμπύλης μορφής	≥3	Τυχαία	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5 - 3.0
Τραχείς γωνιώδεις	2	Τυχαία	2.0	4.0	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2.0
					1.3	2.3	3.0
Τραχείς γωνιώδεις	≥3	Τυχαία	2.2	4.5	2.1	4.2	1.5 - 3.0
Τραχείς γωνιώδεις	2	Ειδική #	5.8	7.0	5.3	6.4	1.5 - 3.0
Τραχ. Διαβαθμ.	##	Τυχαία	2.2	2.5			
Τεχνητοί ογκόλιθοι							
Τετράποδα (Tetrapod/ Quadropod)	2	Τυχαία	7.0	8.0	5.0	6.0	1.5
					4.5	5.5	2.0
					3.5	4.0	3.0
Τρίαβδα (Trbar)		Τυχαία	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
					7.8	8.5	2.0
Τρίαβδα (Trbar)		Ομοιόμ.	12.0	15.0	7.5	9.5	1.5 - 3.0
Δόλοι (Dolos)		Τυχαία	15.8 (§)	31.8 (§)	8.0	16.0	2.0
Εξάποδα (Hexapod)		Τυχαία	8.0	9.5	5.0	7.0	1.5 - 3.0
Ο παραπάνω πίνακας ισχύει για περιορισμένη υπερπήδηση και μετακίνηση έως 5% των ογκολίθων							
(1) Θραυόμενοι κυματισμοί							
(2) Μη θραυόμενοι κυματισμοί							
n*: πλήθος λίθων κατά το πάχος της θωράκισης							
** Οι τιμές K_D για τον κορμό ισχύουν για $\cot\theta=1.5\div 5.0$							
# ο διαμήκης άξονας του ογκολίθου κάθετος στο πρανές							
§ για αποφυγή μικροκινήσεων (rocking) μείωση του K_D κατά 50%							

Το ύψος στέψης του έργου με πρανή προβλέπεται σε υψόμετρο που καθορίζεται από την τιμή της αναρρίχησης που αντιστοιχεί στις εκάστοτε συνθήκες. Για θωράκιση με φυσικούς ογκόλιθους η τιμή της μέγιστης αναρρίχησης δίδεται με την παρακάτω σχέση σε συνάρτηση με το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού (Μουτζούρης, 2005):

$$\frac{\max R}{H} = \frac{0,96}{0,4 + \sqrt{H/L_0} \cdot \cot \theta} \quad (3.12)$$

όπου $\max R$ η μέγιστη υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας πάνω από τη στάθμη ηρεμίας, H το ύψος κύματος στον πόδα του μετώπου, L_0 το μήκος κύματος στα ανοιχτά και θ η γωνία του κεκλιμένου μετώπου.

Όσον αφορά το πάχος των ζωνών θωράκισης και υπόστρωσης, καθώς και το πλάτος στέψης του έργου μπορούν να υπολογισθούν από τη σχέση:

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{B}{\gamma} \right)^{1/3} \quad (3.13)$$

όπου r το ζητούμενο πάχος ή πλάτος, n το πλήθος των ογκολίθων κατά το πάχος της στρώσης, k_{Δ} συντελεστής στρώσης με τιμές που δίνονται από τον Πίνακα 3.2, B το ονομαστικό βάρος των ογκολίθων της στρώσης και γ το ειδικό βάρος του πετρώματος.

Το υλικό του πυρήνα του κυματοθραύστη προσδιορίζεται από τον επιθυμητό βαθμό διαπερατότητας και οικονομικότητας της κατασκευής. Συνήθως, χρησιμοποιείται υλικό βάρους $B/200$ έως $B/6000$. Ο πυρήνας πολλές φορές επεκτείνεται και κάτω από τις στιβάδες θωράκισης, ώστε να αποφευχθεί η απευθείας επαφή των ογκολίθων με τον πυρήνα.

Η δευτερεύουσα θωράκιση ή υπόστρωση κάτω από τη θωράκιση μορφώνεται με λίθους βάρους $B/10$ έως $B/15$, για περιπτώσεις που η θωράκιση αποτελείται από φυσικούς ή τεχνητούς ογκολίθους με $K_D \leq 12$ για τον κορμό του έργου και συνθήκες μη θραυόμενων κυματισμών. Σε αντίθετη περίπτωση η υπόστρωση περιλαμβάνει λίθους βάρους $B/5$ έως $B/10$. Συνιστάται οι βαρύτεροι λίθοι να τοποθετούνται πίσω από τη θωράκιση και οι ελαφρύτεροι κάτω από τη στάθμη $-2 H$.

Το αντέρεισμα ποδός τοποθετείται για τη στήριξη της θωράκισης σε διατομές που δέχονται θραυόμενους κυματισμούς. Το αντέρεισμα μορφώνεται με λιθορριπή ονομαστικού βάρους $B/10$ με διαστάσεις πλάτους τουλάχιστον $3r$ και ύψους $2r$.

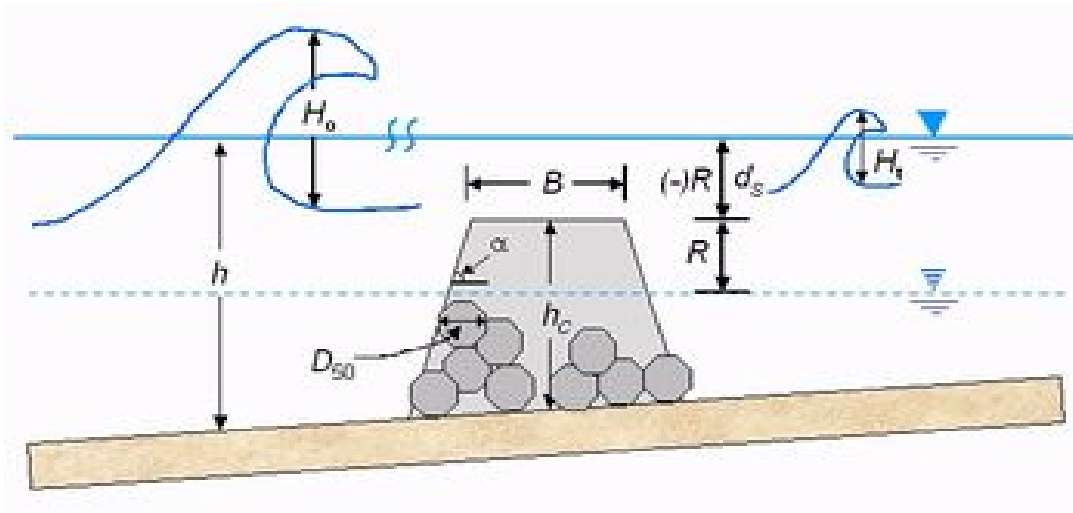
Πίνακας 3.2 Συντελεστής στρώσης και πορώδες για διάφορους ογκολίθους (Μέμος, 2008)

Τύπος ογκολίθου		n	Τοποθέτηση	k _Δ	P (%)
Φυσιικοί ογκολίθους					
Λείοι		2	Τυχαία	1.02	38
Τραχείς		2	Τυχαία	1.00	37
Τραχείς		≥3	Τυχαία	1.00	40
Τεχνητοί ογκολίθους					
Τετράποδα	(Tetrapod)	2	Τυχαία	1.04	50
	(Quadripod)	2	Τυχαία	0.95	49
Τρίραβδα	(Tribar)	2	Τυχαία	1.02	54
Δόλοι	(Dolos)	2	Τυχαία	0.94	56
Κύβοι	(τροποπ.)	2	Τυχαία	1.10	47
Ακρόποδα	(Accropode)	1	Τυχαία	1.51	57 - 62*
Core- Loc		1	Τυχαία	1.51	60 - 64*
*Εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδος.					

Τα ακρομώλια των εξωτερικών έργων αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης της κυματικής δράσης και για αυτό κατασκευάζονται ισχυρότερα από τον αντίστοιχο κορμό του έργου. Η θωράκιση της προσήνεμης πλευράς εκτείνεται και στην υπήνεμη σε μήκος 15 – 45m ανάλογα με τις συνθήκες. Επίσης, για λόγους ευστάθειας, η ακτίνα καμπυλότητας της ισάλου γύρω από το ακρομώλιο συνιστάται να είναι τουλάχιστον τριπλάσια του ύψους κύματος σχεδιασμού. Υπάρχει, βέβαια, και η δυνατότητα μείωσης της κλίσης του πρηνούς στο ακρομώλιο, σε σχέση με τον κορμό του έργου, ούτως ώστε να χρησιμοποιηθούν οι ίδιοι ογκολίθους θωράκισης και στο ακρομώλιο. Συχνά, η στέψη του ακρομωλίου προβλέπεται υψηλότερα από τη στέψη του κορμού, ώστε να εγκαθίστανται εκεί οι αναγκαίοι φάροι σε συνθήκες μηδενικής υπερπήδησης. Προσοχή χρειάζεται στην επένδυση του πυθμένα στον πόδα του έργου στη θέση του ακρομωλίου, καθώς στο σημείο εκείνο η κατασκευή είναι σχετικά ευαίσθητη σε διαβρώσεις.

3.2.4 Υφαλοι κυματοθραύστες

Τα έργα βυθισμένης στέψης, όπως οι ύφαλοι κυματοθραύστες και οι τεχνητοί αναβαθμοί είναι αρκετά εφαρμόσιμα ως μέτρα παράκτιας προστασίας (χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό με τεχνητή αναπλήρωση ακτής). Ο σκοπός τους είναι η μείωση του υδροδυναμικού φορτίου σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ώστε να διατηρείται το ισοζύγιο φερτών της ακτογραμμής. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, οι ύφαλοι κυματοθραύστες σχεδιάζονται ώστε να επιτρέπουν μετάδοση συγκεκριμένου ποσού κυματικής ενέργειας. Για τους έξαλλους αυτό επιτυγχάνεται με την υπερπήδηση πάνω από την κατασκευή και με μερική μετάδοση μέσω των πόρων της κατασκευής. Αντίστοιχα για τους ύφαλους πραγματοποιείται με τη θραύση κυματισμών και την καταστροφή της ενέργειας λόγω της ρήξης της στέψης.



Σχήμα 3.4 Διατομή ύφαλου κυματοθραύστη με το προσπίπτον και το διαδιδόμενο κύμα (www.coastalwiki.org)

Οι ύφαλοι κυματοθραύστες χρησιμοποιούνται με μεγαλύτερη επιτυχία σε περιοχές όπου η διακύμανση της παλίρροιας είναι μικρή. Μπορούν να συνδυαστούν με προβόλους σχήματος L ή T ή με έξαλλους κυματοθραύστες ώστε να διαμορφώσουν μικρές παραλίες. Προκαλούν τη θραύση των μεγαλύτερων (πιο καταστροφικών) κυματισμών, αλλά έχουν μικρή επίδραση στην κανονική καθημερινή δραστηριότητα.

Οι ύφαλοι κυματοθραύστες επιλέγονται συχνά για να προστατεύσουν:

- τα θεμέλια παραλιακών έργων από τις υποσκαφές και τις δυναμικές ενέργειες που προκαλούν τα κύματα
- τις αμμώδεις ακτές και παραλίες που κινδυνεύουν με σοβαρές περιοδικές διαβρώσεις από τη δράση της στερεομεταφοράς
- τις χαμηλές παραλιακές περιοχές που πλημμυρίζουν εξαιτίας των κυματισμών που θραύονται κοντά στην ακτή
- μερικώς την ηρεμία της λεκάνης που σχηματίζεται από τον κυματοθραύστη και την ακτογραμμή, σε περιπτώσεις όπου δεν είναι απαραίτητη η απόλυτη νηνεμία σε αυτή

Η κατασκευή ύφαλων κυματοθραυστών προτιμάται σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλους ή ιστορικής παράδοσης, καθώς εναρμονίζονται αισθητικά με το περιβάλλον. Ακόμη, δεν απομονώνουν εντελώς την προστατευόμενη περιοχή από την ανοιχτή προς το πέλαγος θάλασσα, ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής κυκλοφορία των ρευμάτων και των θαλάσσιων μαζών και συνεπώς η ανανέωση και ο καθαρισμός κατά φυσικό τρόπο των νερών της προστατευόμενης λεκάνης. Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί επίσης το χαμηλό κόστος της κατασκευής. Τέλος, οι βυθισμένοι κυματοθραύστες λειτουργούν και ως φυσικοί ύφαλοι. Προσελκύουν ψάρια οπότε είναι κατασκευές ιδιαίτερα προσφιλείς για τους αλιείς και την παράκτια θαλάσσια πανίδα.

Παρόλα αυτά, οι κατασκευές αυτές παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα. Η υπερπήδηση του νερού δημιουργεί ρεύματα επικίνδυνα για τους κολυμβητές, ενώ η ύψαλη κατασκευή αποτελεί κίνδυνο για τα μικρά σκάφη. Μια ύψαλη κατασκευή παρέχει μόνο μερική εξασθένιση στη δράση του κύματος και, κατά συνέπεια, μερική προστασία των ακτών. Γενικά, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου έργου είναι δύσκολος, επειδή η σωστή λειτουργία του εξαρτάται ταυτόχρονα από τη στάθμη του νερού και τις κυματικές συνθήκες, καθώς και από τη συγκεκριμένη κατασκευή.

Στην περίπτωση των ύψαλων κυματοθραυστών ο παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά κύματος και δέχεται την ενέργεια των κυματισμών, αντίθετα με τις έξαλλες κατασκευές, είναι η στέψη και λιγότερο η κλίση του προσήνεμου πρανούς. Η ευστάθεια των ύψαλων έργων είναι συνάρτηση του σχετικού ύψους στέψης h_c / d_s , του ποσοστού των ζημιών S και του φασματικού αριθμού ευστάθειας N_s^* . Σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση του Van der Meer (1990), τα μεγέθη σε έναν ύψαλο κυματοθραύστη σχετίζονται ως εξής:

$$\frac{h_c}{d_s} = (2,1 + 0,1 \cdot S) e^{-0,14 N_s^*} \quad (3.14)$$

όπου:

h_c το ύψος της κατασκευής

d_s το βάθος του νερού

S δείκτης ζημιών ($= A_e / D_n^2$)

A_e η διαβρωμένη επιφάνεια επί της διατομής του έργου

D_n η ονομαστική διάμετρος των λίθων θωράκισης ($= (B / \gamma)^{1/3}$)

N_s^* φασματικός αριθμός ευστάθειας ($= H_s / (\Delta D_n s_p^{1/3})$)

H_s το χαρακτηριστικό ύψος κύματος

$\Delta = \delta - 1$

δ ο λόγος των ειδικών βαρών γ/γ_v

s_p τοπική κλίση κυμάτων ($= H_s / L_p$)

L_p τοπικό μήκος κύματος

3.3 Πρόβολοι

Το έργο προστασίας της ακτής του οποίου ο διαμήκης άξονας είναι κάθετος ή σχεδόν κάθετος στην ακτογραμμή και συνδέεται με αυτή έχει καθιερωθεί να ονομάζεται πρόβολος (groynes). Οι πρόβολοι ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, κάτι που τους καθιστά το παλαιότερο και πιο διαδεδομένο έργο σταθεροποίησης της ακτής. Η κατασκευή προβόλων έχει ως κύριο στόχο τον έλεγχο της στερεοπαροχής για την προστασία

της ακτής από διάβρωση και την συσσώρευση ιζήματος για τη διατήρηση ενός ελάχιστου πλάτους ακτής. Το προστατευόμενο μήκος της ακτογραμμής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το μήκος του προβόλου και τη γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών. Για τα συνηθισμένα οικονομικά μήκη προβόλων και τις εμφανιζόμενες κλίμακες μήκους ακτών υπό διάβρωση, σχεδόν ποτέ δεν επαρκεί ένας μεμονωμένος πρόβολος για την προστασία της ακτής. Συνήθως, απαιτείται ένα σύστημα διαδοχικών προβόλων, όχι απαραίτητα σταθερών χαρακτηριστικών (μήκος, στέψη, διαπερατότητα, κλπ.), που καλύπτει όλο το μήκος της προστατευόμενης ακτής.

Ο πρόβολος επηρεάζει την ενέργεια που κινείται κατά μήκος της ακτής και επιδρά στο φορτίο των ιζημάτων που μεταφέρεται, είτε σε αιώρηση, είτε στον πυθμένα. Επομένως, σημαντικά σημεία σχεδιασμού ενός προβόλου ή συστήματος προβόλων είναι η ενέργεια κατά μήκος της ακτής, το ίζημα της περιοχής, η στερεοπαροχή κατά μήκος και εγκάρσια στην ακτογραμμή.



Εικόνα 3.3 Χαρακτηριστικοί πρόβολοι για την προστασία αμμωδών ακτών στην Αυστραλία
(www.sunshinecoast.qld.gov.au, blog.ltc.mq.edu.au)

Ο πρόβολος αποτελεί ένα εμπόδιο στην κίνηση των ιζημάτων κατά μήκος της ακτής και η μορφή της ακτογραμμής προσαρμόζεται στην παρουσία αυτού του εμποδίου. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα παρατηρείται απόθεση ιζήματος ανάντη του έργου, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του πλάτους της ακτής, ενώ, παράλληλα, εμφανίζεται διάβρωση κατάντη. Ο έλεγχος της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η νέα ακτογραμμή να είναι ομαλή με όσο το δυνατόν ομοιόμορφο πλάτος. Για αυτό το λόγο, κάποια ποσότητα ιζήματος πρέπει να περνάει κατάντη της κατασκευής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί:

- επιλέγοντας το κατάλληλο μήκος προβόλου σε σχέση με το οριακό βάθος, ώστε το ίζημα να περνά, γύρω από το άκρο του προβόλου, στα κατάντη (by-passing). Ως οριακό βάθος ορίζεται το βάθος του νερού το οποίο σηματοδοτεί το όριο της στερεομεταφοράς, με τιμή $(1,6 - 2) \cdot H_s$ κάτω από την κατώτατη στάθμη. Όταν το άκρο ενός προβόλου φθάνει σε βάθος μεγαλύτερο από το οριακό τότε δεν περνά καθόλου ίζημα γύρω από αυτό. Όσο αυξάνεται η απόσταση του προβόλου από το οριακό βάθος, τόσο αυξάνεται και το αντίστοιχο ποσοστό του ιζήματος.

- κατασκευάζοντας τον πρόβολο διαπερατό, ώστε να περνά κάποια ποσότητα μέσα από την κατασκευή (through-passing).
- προσαρμόζοντας την στάθμη της στέψης κατά μήκος του έργου, ώστε να περνά ένα ποσοστό πάνω από την κατασκευή (over-passing). Πειράματα έχουν δείξει ότι δεν μπορεί να εφαρμοσθεί μείωση της στάθμης της στέψης κατά μήκος της ζώνης θραύσης καθώς μπορεί να προκληθεί, ανάλογα με τη δίαιτα της παλίρροιας, ανεξέλεγκτη απώλεια ιζήματος.

Η επιλογή συστήματος προβόλων για την προστασία ακτής από διάβρωση απαιτεί προσεκτική προκαταρκτική έρευνα καθώς η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγάλη. Έτσι, πριν από την επιλογή και το σχεδιασμό του έργου, σημαντικά κρίνονται ο προσδιορισμός του μηχανισμού διάβρωσης, η εκτίμηση της στερεομεταφοράς και του ισοζυγίου των φερτών και η πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων που θα έχει στην ακτή. Πολλές φορές ανεπαρκής σχεδιασμός των προβόλων, εξαιτίας της έλλειψης κατανόησης της λειτουργίας των κατασκευών αυτών, έχει οδηγήσει σε αστοχία και ανεξέλεγκτη παραμόρφωση της παράκτιας ζώνης. Μορφές αστοχίας στην περίπτωση αυτών των έργων θεωρούνται η συγκράτηση ανεπαρκούς ποσότητας ιζήματος, εντονότερη διάβρωση κατάντη και δημιουργία ακτής ανομοιόμορφου πλάτους. Γενικά θεωρείται ότι το χρονικό διάστημα του ενός έτους είναι ενδεικτικό για το κατά πόσο το έργο επέφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα στη διαμόρφωση της νέας ακτογραμμής.



Εικόνα 3.4 Σύστημα διαδοχικών προβόλων για τη διατήρηση επαρκούς πλάτους σε ακτή της Ολλανδίας
(www.kennisbank-waterbouw.nl)

Η ικανοποιητική στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής είναι βασικός παράγοντας για να λειτουργούν αποτελεσματικά οι πρόβολοι. Σημαντικό για την επιλογή ενός συστήματος

προβόλων ως έργου προστασίας μιας ακτής, είναι να υπερισχύει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά έναντι της εγκάρσιας. Οι πρόβολοι κατασκευάζονται σε περιοχές όπου η διάβρωση οφείλεται στην παράλληλη προς την ακτή συνιστώσα της στερεομεταφοράς. Επίσης, είναι το πλέον κατάλληλο έργο όταν υπάρχει μικρή καθαρή στερεοπαροχή, αλλά μεγάλη αθροιστική (Reeve et al., 2004). Από την καθαρή στερεοπαροχή εξαρτάται ο ρυθμός πρόσχωσης και διάβρωσης της ακτής ανάντη και κατάντη του προβόλου αντίστοιχα. Σε περιοχές όπου η καθαρή στερεοπαροχή είναι μεγάλη ή σε περιοχές όπου η στερεομεταφορά γίνεται κυρίως προς μια κατεύθυνση, οι ρυθμοί πρόσχωσης και διάβρωσης θα είναι υψηλοί.

Από την άλλη, για να αποφευχθεί η αστοχία, δεν πρέπει να επιλέγεται η κατασκευή τέτοιων έργων σε περιπτώσεις όπου:

- η εγκάρσια στερεομεταφορά υπερισχύει της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς
- δημιουργούνται πολύ ισχυρά ρεύματα διαφυγής, τα οποία αποτελούν κίνδυνο για τους λουόμενους
- το μεγάλο εύρος παλίρροιας επιτρέπει μεγάλη ποσότητα ιζήματος να περάσει από το άκρο του προβόλου (by-passing) στην περίπτωση της ρηχίας και, αντίστοιχα, πάνω από την κατασκευή (over-passing) στην περίπτωση της πλήμμης

Τέλος, πρέπει να αποφεύγεται η κατασκευή προβόλων αδιαπέρατων ή/και πολύ μεγάλου μήκους, καθώς προκαλούν τη διαφυγή του ιζήματος προς τα ανοιχτά και διάβρωση κατάντη. Σήμερα εμφανίζεται η τάση να κατασκευάζονται πρόβολοι που επιτρέπουν σε ένα ποσοστό ιζήματος να περάσει κατάντη του έργου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επίσης πολλές φορές οι κατασκευές αυτές συνδυάζονται με έργα αναπλήρωσης ακτής και έχουν ως στόχο τη συγκράτηση του δανείου υλικού που τοποθετείται στην ακτή.

3.3.1 Μηχανισμός λειτουργίας προβόλων

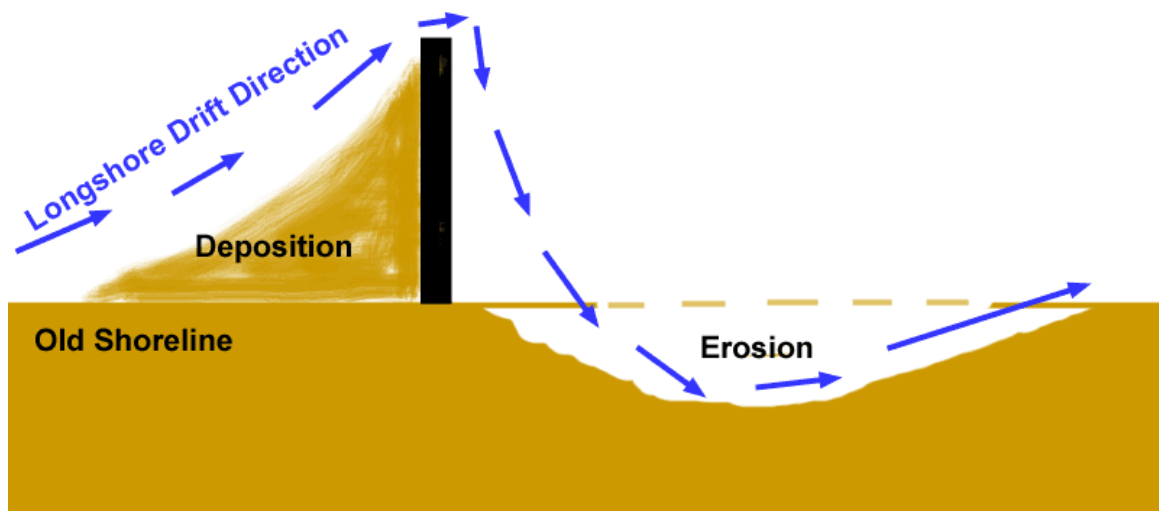
Ο πρόβολος αποτελεί ένα εμπόδιο στην παράλληλη, προς την ακτή, συνιστώσα της στερεομεταφοράς, που, υπό ασθενείς και μέτριες κυματικές συνθήκες, διαχέει μέρος της κυματικής ενέργειας, προκαλώντας συσσώρευση του ιζήματος στην ανάντη πλευρά της κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του προσανατολισμού της ακτογραμμής και τη μείωση της γωνίας μεταξύ αυτής και της διεύθυνσης των επικρατούντων κυματισμών, καθώς η ακτογραμμή τείνει να γίνει παράλληλη με αυτούς. Η νέα ακτογραμμή διαμορφώνεται έτσι ώστε να είναι κάθετη στις ορθογωνικές των προσπιπτόντων θραυόμενων κυματισμών, με αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού της καθαρής στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής (οι στερεοπαροχές προς τις δύο αντίθετες κατευθύνσεις τείνουν να έρθουν σε ισορροπία), τον περιορισμό της απομάκρυνσης του ιζήματος και την ανακατανομή του υλικού ανάντη του προβόλου. Η αποτελεσματικότητα των προβόλων εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της αρχικής και της νέας ακτογραμμής, που δίνει μηδενική στερεομεταφορά. Εάν η γωνία αυτή είναι μικρή, τότε το σύστημα είναι αποτελεσματικό, ενώ όταν είναι μεγάλη, δηλαδή στην περίπτωση πολύ λοξής πρόσπτωσης των κυματισμών, το σύστημα δεν είναι αποτελεσματικό.

Στην κατάντη πλευρά του έργου παρατηρείται διάβρωση, καθώς η ποσότητα του ιζήματος που περνά περιορίζεται σημαντικά. Τα αποτελέσματα της παρουσίας του προβόλου ή ενός

συστήματος προβόλων στην παράκτια ζώνη είναι εμφανή τόσο ανάντη όσο και κατάντη αυτού. Το ποσοστό συσσώρευσης και διάβρωσης εξαρτάται από το ρυθμό στερεομεταφοράς στην περιοχή. Μετά την έναρξη παρακάμψεως του προβόλου, δηλαδή μετά την πλήρωσή του στα ανάντη από το ίζημα, η ζώνη διαβρώσεως αρχίζει να προσχώνεται και η ακτογραμμή επεκτείνεται προς τη θάλασσα ως μια νέα θέση ισορροπίας.

Κατά τη διάρκεια καταιγίδας, κυρίως όταν οι κυματισμοί προσπίπτουν κάθετα στην ακτή, ο ρόλος ενός προβόλου περιορίζεται, καθώς τα ιζήματα παρασύρονται προς τα ανοιχτά. Η αποτελεσματικότητα της κατασκευής, όσον αφορά την προστασία της ακτής, περιορίζεται, καθώς δεν συνεισφέρει στη μείωση της κυματικής ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, οι πρόβολοι συμπεριφέρονται ως κατασκευές μικρού μήκους σε σχέση με το πλάτος της ζώνης θραύσης, καθώς κύματα μεγάλου ύψους θραύονται σε βαθύτερα νερά και αυξάνεται έτσι το πλάτος της ζώνης θραύσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται διάβρωση γύρω από αυτούς.

The Function of a Groin



Σχήμα 3.5 Μηχανισμός λειτουργίας προβόλου (www.pixgood.com)

3.3.2 Παράμετροι σχεδιασμού προβόλων

Μήκος προβόλου

Το 80 έως 90% της στερεομεταφοράς κατά μήκος μιας ακτής σημειώνεται στη ζώνη μετά τη θραύση. Κατά συνέπεια, και δεδομένου ότι τα αντιμετωπιζόμενα προβλήματα σχετίζονται σχεδόν πάντα με διακίνηση ιζημάτων, ένας πρόβολος επιβάλλεται να φτάνει ως τη ζώνη πριν από τη θραύση. Ένας τέτοιος πρόβολος επιτυγχάνει τη μέγιστη απόδοση. Το μήκος, τελικά, ενός προβόλου θα προκύψει από τη θέση της ζώνης θραύσεως, αφού προηγηθεί λεπτομερειακός έλεγχος όλων των πιθανών κυματικών σεναρίων στην περιοχή μελέτης του έργου.

Το μήκος του προβόλου, εκτός των άλλων, καθορίζεται επίσης από τον ελάχιστο αποδεκτό αριθμό ετών, πριν σημειωθεί παράκαμψη του προβόλου από τα ιζήματα. Το κριτήριο αυτό είναι τεχνικοοικονομικό, επειδή συνεπάγεται τη δαπάνη της απομακρύνσεως με βυθοκόρηση των συσσωρευμένων ιζημάτων στα ανάντη του προβόλου στο εκάστοτε πέρασμα των ετών που προαναφέρθηκε, ούτως ώστε να αποφεύγεται η παράκαμψη του έργου.

Πιθανές ανάγκες λόγω ναυσιπλοΐας στην περιοχή μελέτης, αρκετές φορές επιβάλλουν την κατασκευή προβόλων μικρότερου μήκους και, συνεπώς, χαμηλότερης αποδοτικότητας.

Το τμήμα ξηράς του προβόλου, που εκτείνεται στα ανώτερα τμήματα της ακτής, απαιτείται να έχει ένα επαρκές μήκος, ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική αγκύρωση του έργου στη θέση κατασκευής και να αποφευχθεί η διάβρωσή του, ιδιαίτερα στα αμέσως κατάντη.

Ύψος προβόλου

Υψηλός θεωρείται ο πρόβολος, του οποίου η στέψη βρίσκεται υψηλότερα από τη στάθμη ηρεμίας θάλασσας. Η στέψη του είναι οριζόντια, εκτός από το τμήμα ξηράς, στο οποίο μπορεί να υπάρχει κλίση προς τη θάλασσα, ιδιαίτερα σε ευρείες ακτές. Κατά τον Bruun η στέψη θα πρέπει να βρίσκεται σε μία στάθμη τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη δυνατή στάθμη θάλασσας επαυξημένη κατά το ύψος της μέγιστης υπερύψωσης των κυμάτων στη ζώνη μετά τη θραύση.

Χαμηλός είναι ο πρόβολος, του οποίου η στέψη βρίσκεται σε στάθμη χαμηλότερη από τη στάθμη ηρεμίας. Στη γενικότερη περίπτωση ενός τέτοιου προβόλου διακρίνονται τρία τμήματα:

- το οριζόντιο τμήμα ξηράς
- το ενδιάμεσο κεκλιμένο τμήμα
- το τμήμα κεφαλής

Η στάθμη στέψεως στο τμήμα ξηράς ορίζεται κατά Bruun, όπως αναφέρθηκε. Σε πολύ ευρείες ακτές το τμήμα ξηράς μπορεί να είναι ελαφρά κεκλιμένο προς τη θάλασσα. Το τμήμα ξηράς φτάνει μέχρι την αρχή του μετώπου της ακτής. Η στέψη του ενδιάμεσου κεκλιμένου τμήματος είναι παράλληλη με το υφιστάμενο ή επιδιωκόμενο μέτωπο ακτής. Το μήκος αυτού του τμήματος εξαρτάται από τη θέση της ζώνης θραύσεως και το μήκος του μετώπου της ακτής. Τέλος, το τμήμα κεφαλής εκτείνεται στη ζώνη πριν τη θραύση, ενώ η στέψη του είναι οριζόντια σε στάθμη που ορίζεται από τη μέθοδο κατασκευής και το βάθος του πυθμένα στην περιοχή.

Αν και η απόδοση ενός χαμηλού προβόλου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ενός υψηλού με ίδιο μήκος, η επιλογή τέτοιου τύπου προβόλου είναι σε ορισμένες περιπτώσεις μονόδρομος για λόγους ναυσιπλοΐας ή γιατί δεν είναι απαραίτητη η συγκράτηση όλου του φορτίου στερεομεταφοράς.

Προσανατολισμός άξονα προβόλου

Αν και η συγκεκριμένη παράμετρος δεν έχει ερευνηθεί ακόμη εις βάθος, είναι κοινή αντίληψη, ότι ο προσανατολισμός είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών. Από οικονομικής απόψεως, είναι προτιμότερο να κατασκευασθεί ένας πρόβολος με τον διαμήκη άξονα κάθετα στην ακτογραμμή. Για μία σταθερή γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων, ένας πρόβολος έχει βέλτιστη απόδοση στη συγκράτηση ιζημάτων, όταν ο άξονάς του κατευθύνεται ελαφρά προς τα ανάντη της ροής ιζημάτων. Για μεταβλητές γωνίες, παρόλα αυτά, βέλτιστος προσανατολισμός είναι ο κάθετος στην αρχική ακτογραμμή. Φυσικά, αν προβλέπεται από τη μελέτη ουσιαστική μεταβολή της ακτογραμμής μετά την κατασκευή του έργου, συνιστάται ο άξονας του προβόλου να είναι κάθετος στην τελική θέση της ακτογραμμής.

Διαπερατότητα προβόλου

Η διαπερατότητα ενός προβόλου είναι το μέγεθος που προκαλεί τη μείωση της συσσώρευσης ιζημάτων στα ανάντη του και τη διάβρωση στα κατόντη του. Ο σύγχρονος σχεδιασμός προβόλων βάζει την παράμετρο της μερικής διαπερατότητάς τους (by-pass) για να μειωθεί ο κίνδυνος διάβρωσης κατόντη. Έτσι, επιλέγονται κοντύτεροι πρόβολοι, πιο πορώδεις, κλπ. Αποτελέσματα ερευνών προτείνουν να κατασκευάζεται μονάχα σύστημα διαπερατών προβόλων και όχι μεμονωμένες διαπερατές κατασκευές. Η διαπερατότητα επιτυγχάνεται με κατάλληλα ανοίγματα στον κορμό της κατασκευής, η στάθμη των οποίων ποικίλλει ανάλογα τον επιθυμητό στόχο. Πάντως, αν δεχθούμε ότι στη ζώνη μετά τη θραύση το μεγαλύτερο ποσοστό στερεομεταφοράς λαμβάνει χώρα ως φορτίο πυθμένα, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι χαμηλότερες στάθμες ανοιγμάτων στον πρόβολο επιτρέπουν τη διέλευση ιζημάτων, ενώ, αντίστοιχα, υψηλότερες στάθμες επιτρέπουν λιγότερο την κίνηση των ιζημάτων και περισσότερο τη διέλευση κυματικής ενέργειας.

Υλικό κατασκευής

Συνηθέστερα υλικά κατασκευής είναι οι ογκόλιθοι και οι λίθοι λατομείου, καθώς και τεχνητοί ογκόλιθοι από άοπλο σκυρόδεμα. Τέτοιες κατασκευές διαμορφώνονται, συνήθως, με κεκλιμένα πρανή. Σε περιπτώσεις που η κατασκευή χρειάζεται να διαμορφωθεί με κατακόρυφο μέτωπο, ο πρόβολος κατασκευάζεται από τεχνητούς ογκόλιθους μορφής ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου ή στοιχεία ειδικής μορφής (συρματοκιβώτια, κλπ.). Σπανιότερα, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή προβόλων ξυλεία, πασσαλοσανίδες, προεντεταμένο σκυρόδεμα, κ.ά.

Απόσταση διαδοχικών προβόλων

Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών προβόλων σε ένα σύστημα κατασκευών έχει επικρατήσει να δίνεται συχνά ως συνάρτηση του μήκους των προβόλων. Έχουν δοθεί διάφορες σχέσεις στη βιβλιογραφία για αυτή τη συνάρτηση και οι περισσότερες προτείνουν να χρησιμοποιείται μία τιμή απόστασης, ίση με 1 έως 4 φορές το μήκος του προβόλου. Συνιστάται, όμως, να επιλέγεται ως απόσταση ίση με 2,5 φορές το μήκος του προβόλου.

Σημειώνεται ότι η παραπάνω θεώρηση είναι σχετικά απλουστευτική και δεν λαμβάνει υπόψιν τυχόν ιδιαιτερότητες κάθε παράκτιας ζώνης. Ο υπολογισμός της απόστασης σε ένα σύστημα προβόλων θα μπορούσε, με μεγαλύτερη ακρίβεια, να γίνει με χρήση της θεωρίας εξέλιξης της ακτογραμμής και της διάβρωσης στα κατόντη του προβόλου.

Πάντως, είναι γεγονός ότι ένα σύστημα προβόλων, στο οποίο οι διαδοχικοί πρόβολοι απέχουν μεταξύ τους μεγάλη απόσταση, παύει να λειτουργεί ως σύστημα και κάθε πρόβολος δρα μεμονωμένα. Ομοίως, αν οι αποστάσεις είναι μικρές, το σύστημα τείνει να εκτρέψει όλο το φορτίο ιζημάτων στα ανοιχτά, οπότε δεν εμφανίζονται οι αναμενόμενες επεκτάσεις της ακτής.

Σχεδιασμός διατομής προβόλου

Η χάραξη και ο υπολογισμός της ευστάθειας της διατομής ενός προβόλου γίνεται με ανάλογες μεθόδους, όπως στο σχεδιασμό των εξωτερικών λιμενικών έργων, με ουσιαστική διαφορά ότι η πρόσπτωση των κυματισμών στους πρόβλους πραγματοποιείται κυρίως πλάγια και κατά συνέπεια πρέπει να τροποποιούνται κατάλληλα οι υπολογισμοί.

Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο που απαιτεί προσοχή αποτελεί η μεταβολή των χαρακτηριστικών του κύματος σχεδιασμού κατά μήκος του άξονα του προβόλου. Αυτό οφείλεται στη μεταβολή του βάθους του πυθμένα, διότι τμήμα του προβόλου βρίσκεται στη ζώνη θραύσεως και τμήμα στη ζώνη μετά τη θραύση. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του σχεδιασμού του προβόλου σε διακριτά τμήματα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κύματος και τα αντίστοιχα βάθη πυθμένα.

3.4 Θωράκιση μετώπου ακτής

Τα έργα θωράκισης της ακτής είναι έργα που κατασκευάζονται στο μέτωπο της ακτής, σε επαφή με αυτή και σκοπός τους είναι η προστασία της ακτογραμμής έναντι διαβρώσεως. Τις περισσότερες φορές κατασκευάζονται με επένδυση της προσβαλλόμενης ακτής με ογκόλιθους, πλάκες, ή στοιχεία ειδικής μορφής. Η επένδυση ανθίσταται στη θαλάσσια δράση κυρίως με το ίδιο βάρος των στοιχείων θωρακίσεως, σε συνδυασμό βέβαια με την πλοκή μεταξύ τους. Με ειδικού τύπου μεθόδους, μπορεί να αυξηθεί η δύναμη θωρακίσεως με χρήση ειδικών συγκολλητικών ουσιών και με κατάλληλη αγκύρωση.

Ένα στοιχείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στο σχεδιασμό είναι πως η θωράκιση του μετώπου είναι ευαίσθητη σε υποσκαφή στον πόδα του έργου και σε διάβρωση στα αμέσως κατάντη, προβλήματα τα οποία οφείλονται στη μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στα σημεία αυτά. Χαρακτηριστικά, έχουν σημειωθεί αρκετές αστοχίες τέτοιου τύπου σε ανάλογα έργα, ιδιαίτερα σε λείες θωρακίσεις, όπως αυτές που κατασκευάζονται με πλάκες. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων, η προστασία του πόδα γίνεται με λιθορριπή ή στοιχεία ειδικής μορφής. Αντίθετα, η προστασία της κατάντη περιοχής δεν είναι πάντοτε δυνατή. Συνήθως, απαιτείται η συνέχιση της θωρακίσεως έως την πλησιέστερη θέση με ανθεκτικό πέτρωμα ή σε σημείο που υπάρχει σημαντική μεταβολή της μορφής της ακτογραμμής.

Η θωράκιση του μετώπου μίας ακτής γίνεται με: (α) έργα με κλίση (επένδυση με ογκόλιθους που ευνοούν τη θραύση), (β) έργα με κατακόρυφο μέτωπο (επένδυση με πλάκες), (γ) ειδικούς τύπους θωρακίσεως.

3.4.1 Θωράκιση με κεκλιμένο μέτωπο

Έργα θωράκισης με κεκλιμένο μέτωπο κατασκευάζονται κυρίως με επένδυση από ογκόλιθους. Η θωράκιση ενός μετώπου με ογκόλιθους είναι η κλασικότερη μέθοδος προστασίας. Συνηθέστερα, χρησιμοποιούνται ογκόλιθοι γωνιώδεις, λατομείου ή τεχνητοί από άοπλο σκυρόδεμα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα λατομείου στην περιοχή και διάφορα άλλα τεχνικοοικονομικά μέσα. Η διαδικασία κατασκευής είναι παρόμοια με τη διαδικασία που ακολουθείται σε εξωτερικά λιμενικά έργα με πρανή. Κατασκευάζεται μία βάση από λιθοσύντριμμα, η οποία λειτουργεί ως στρώμα εδράσεως. Επάνω σε αυτή τοποθετούνται λίθοι, μικρότερης διαμέτρου από τους αντίστοιχους της θωρακίσεως, οι οποίοι δημιουργούν ένα φίλτρο για την προστασία της κατασκευής. Τέλος, πάνω στο συγκεκριμένο φίλτρο αλληλοεμπλέκονται οι ογκόλιθοι θωράκισης που αποτελούν την κυρίως προστασία του μετώπου.

Βασικό κριτήριο για το σχεδιασμό με ογκόλιθους λατομείου είναι η αποφυγή αστοχίας από μετακίνηση των ογκολίθων, ενώ, για τους τεχνητούς ογκόλιθους αντίστοιχα, η αποφυγή αστοχίας από ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και όχι από μετακίνηση. Υπάρχουν διάφοροι τύποι χρησιμοποιούμενων λίθων, όπως κύβοι, δόλοι και τετράποδα. Οι κύβοι προστατεύουν κυρίως με το ίδιο βάρος τους, ενώ οι δύο άλλοι τύποι με τον τρόπο που αλληλοσυνδέονται.

3.4.2 Θωράκιση με κατακόρυφο μέτωπο

Τα έργα με κατακόρυφο ή σχεδόν κατακόρυφο μέτωπο κατασκευάζονται κυρίως με επένδυση από πλάκες. Συγκεκριμένα, γίνεται επένδυση όλου του προσβαλλόμενου μετώπου με πλάκες, οι οποίες μπορεί να έχουν κανονικό σχήμα (ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο) ή ακανόνιστο και τοποθετούνται σε απλή παράθεση. Κατασκευάζονται από σκυρόδεμα, εκτός από ειδικές περιπτώσεις που χρησιμοποιείται κάποιο πέτρωμα, όπως βασάλτης. Οι διαστάσεις τους ποικίλλουν ανάλογα με το υλικό και το σκοπό χρήσης τους. Οι μεγάλες πλάκες είναι δυνατό να καλύπτουν εγκάρσια όλο το προσβαλλόμενο μέτωπο. Πρέπει να αγκυρώνονται επαρκώς στον πυθμένα και να αφήνονται ενδιάμεσα αρμοί διαστολής, στους οποίους τοποθετείται ειδική μαστίχη. Η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται συνήθως με χαλύβδινους συνδέσμους. Αντίθετα, μικρότερες πλάκες συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλη πλοκή. Σε κάθε περίπτωση, σημαντική είναι η προστασία της βάσης της κατασκευής για την αποτροπή της υποσκαφής του πόδα. Η θωράκιση του μετώπου της ακτής με πλάκες δεν είναι ιδιαίτερα διαδομένη μέθοδος στον ελλαδικό χώρο, σε αντίθεση με ακτές της βόρειας Ευρώπης, στις οποίες συναντώνται περισσότερες τέτοιες κατασκευές.

Οριακή περίπτωση της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η κατασκευή θαλάσσιου τοίχου παράκτιας προστασίας από τεχνητούς ογκόλιθους από άοπλο σκυρόδεμα. Η χρήση πασσαλοσανίδων για την κατασκευή του τοίχου, αν και είναι δυνατή, δεν συνηθίζεται. Ο τοίχος θωράκισης μελετάται ανάλογα με ένα εσωτερικό λιμενικό έργο με κατακόρυφα μέτωπα, λαμβάνοντας υπόψιν την ώθηση του ανακουφιστικού πρίσματος, τις δράσεις από το νερό και τα σεισμικά φορτία.

3.4.3 Ειδικοί τύποι θωρακίσεως

Σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ειδικές κατασκευές για τη θωράκιση του μετώπου, όπως αμμόσακκοι, αμμοσωλήνες, επιμήκεις κυλινδρικοί αμμόσακκοι και

συρματοκιβώτια. Οι απλοί ή ενισχυμένοι αμμόσακκοι είναι ο φθηνότερος και παλαιότερος ειδικός τύπος θωράκισης. Οι αμμοσωλήνες αποτελούνται από ένα κυλινδρικό περίβλημα από ειδικό σκληρό υλικό, το οποίο περιέχει λεπτόκοκκο υλικό. Τα συρματοκιβώτια αποτελούνται από ένα επίμηκες κυλινδρικό συρμάτινο περίβλημα με μικρούς αμμόσακκους ή χονδρόκοκκο υλικό.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου έγκειται κυρίως σε οικονομικούς λόγους. Το περίβλημα των αμμοσωλήνων και συρματοκιβωτίων διατίθεται στο εμπόριο από εξειδικευμένους οίκους, με αποτέλεσμα να αυξάνει το κόστος εφαρμογής τους. Ταυτόχρονα, όμως, πρόκειται για ανθεκτικότερες κατασκευές σε καταπονήσεις. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα των συρματοκιβωτίων έναντι των αμμοσωλήνων και, ακόμη περισσότερο, των αμμόσακκων είναι ότι επιτυγχάνουν σημαντικότερη μείωση της αναρρίχησης του κύματος. Οι αμμοσωλήνες, αντίθετα, αντιστέκονται καλύτερα στη θαλάσσια δράση. Η αποτελεσματικότητά τους βέβαια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επαρκή αγκύρωση.

Εν κατακλείδι, η επιλογή της μεθόδου θωρακίσεως που θα χρησιμοποιηθεί είναι αποτέλεσμα πολλών παραμέτρων, όπως οικονομικές και τεχνικές παράμετροι, η φύση του μετώπου, η κλίση του και τα πετρώματα που συναντώνται, τα διαθέσιμα μέσα, το κυματικό κλίμα της περιοχής και οι δράσεις από το νερό, η ύπαρξη ιζήματος και ο προσδοκώμενος βαθμός προστασίας της ακτής.

3.5 Μέθοδοι αναπλήρωσης της ακτής

Η αναπλήρωση μίας παράκτιας περιοχής με δάνειο ίζημα παρόμοιο με το ίζημα που υπάρχει στον πυθμένα αυτής είναι μία εναλλακτική τεχνική προστασίας μίας υπό διάβρωση ακτής. Είναι μία μέθοδος που εφαρμόζεται κυρίως σε ακτές που πλήττονται από διάβρωση σε μεγάλο μήκος τους (κλίμακα μήκους χιλιομέτρων), χωρίς να αποκλείεται η χρήση της και σε μικρότερες κλίμακες, όπως στην ακτή τουριστικών μονάδων ή μικρών παράκτιων οικισμών. Η αναπλήρωση μπορεί να εξασφαλίσει σε μία ακτή, εκτός από προστασία έναντι διάβρωσης, και πρόσκαιρη, τουλάχιστον, αύξηση της ζώνης αναψυχής, στοιχείο ιδιαίτερος σημαντικό σε μέρη μεγάλου τουριστικού ενδιαφέροντος.

Η διάρκεια ζωής μίας αναπλήρωσης ακτής είναι περιορισμένη τις περισσότερες φορές και χρειάζεται επανάληψη με το πέρας ορισμένου αριθμού ετών. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τις παράκτιες δράσεις στην περιοχή και από την ύπαρξη ή όχι έργων συγκράτησης του ιζήματος. Γενικώς πάντως, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της αναπλήρωσης ακτής είναι ότι θεωρείται «πράσινη» μέθοδος και η οικολογικότερη επιλογή για την προστασία έναντι διάβρωσης, διότι δεν απαιτεί κατασκευή έργων που παραμορφώνουν την όψη της ακτής και επιβαρύνουν το περιβάλλον της παράκτιας ζώνης. Βέβαια, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν έργα συγκράτησης του ιζήματος, επιμηκύνεται σημαντικά ο χρόνος επανάληψης της αναπλήρωσης, αλλά από την άλλη αυξάνει κατακόρυφα ο προϋπολογισμός του έργου και υποβαθμίζεται το περιβάλλον.



Εικόνα 3.5 Πρόγραμμα εκτεταμένης αναπλήρωσης ακτής στο Atlantic City των ΗΠΑ (www.gldd.com)

Η αλήθεια είναι ότι η μέθοδος αναπλήρωσης της ακτής είναι σχετικά ακριβή μέθοδος παράκτιας προστασίας, κάτι που την καθιστά εύκολα απαγορευτική ειδικά για ακτές περιορισμένου μήκους. Το κόστος του έργου ανά μέτρο μήκους έχει αποδειχθεί ότι μειώνεται με την αύξηση του μήκους της υπό προστασία ακτής. Εκτός των άλλων, σημαντικό στοιχείο είναι η αυξημένη πιθανότητα αστοχίας τέτοιων έργων, καθώς η πλήρης εξασφάλιση και σίγουρη εκτίμηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο φαινόμενο είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί, ακόμη και με υπερδιαστασιολόγηση. Έτσι, λοιπόν, για την επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου σε μία ακτή είναι απαραίτητη μία τεχνικοοικονομική εξέταση που θα λαμβάνει υπόψιν:

- τους παράκτιους μηχανισμούς που δρουν στην ακτή
- τα στοιχεία του επιτόπιου ιζήματος
- τη διαθεσιμότητα, την ποσότητα, την ποιότητα και την απόσταση δάνειου ιζήματος
- ρεαλιστική εκτίμηση του χρόνου ζωής του έργου και, αντίστοιχα, του απαιτούμενου χρόνου επανάληψης της διαδικασίας
- σωστή εκλογή πιθανών απαραίτητων έργων συγκράτησης του ιζήματος
- ρεαλιστική εκτίμηση της πιθανότητας αστοχίας του έργου και των παραμέτρων που χρήζουν προσοχής για την αποφυγή αστοχίας
- περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες και χρήσεις γης στην περιοχή

Για τον σωστότερο σχεδιασμό μίας αναπλήρωσης ακτής με τοποθέτηση ιζήματος μείζον ζήτημα αποτελεί η διερεύνηση της διατομής ισορροπίας της συγκεκριμένης παράκτιας ζώνης. Η αναπλήρωση οφείλει να δώσει τέτοιο αποτέλεσμα που να προσεγγίζει όσο είναι δυνατό τη διατομή ισορροπίας. Όταν σε μία ακτογραμμή απορριφθεί μία ποσότητα ιζήματος γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυτομάτως μεταβάλλονται οι συνθήκες στερεομεταφοράς, οι ζώνες δράσεις της κυματικής ενέργειας και η γενικότερη ισορροπία του συστήματος. Αποτέλεσμα, λοιπόν, είναι η ενεργοποίηση παράκτιων μηχανισμών με σκοπό το σύστημα της συγκεκριμένης παράκτιας ζώνης να φτάσει σε μία νέα ισορροπία. Συνεπώς, βασικό στοιχείο είναι η διαμορφωμένη τεχνητά κλίση πυθμένα να είναι όσο το δυνατό παρόμοια με την κλίση της διατομής ισορροπίας στην παράκτια ζώνη. Συν τοις άλλοις, προτιμότερο είναι το δάνειο ιζήμα να έχει ίσου ή μεγαλύτερου μεγέθους κόκκους από το υπάρχον. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η ανούσια απώλεια ιζήματος στα ανοιχτά και η καλύτερη διανομή του υλικού στον παράκτιο χώρο. Η περίμετρος προς τη θάλασσα της ζώνης αναπληρώσεως είναι κρίσιμη για την ευστάθεια του έργου. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις οδηγούν σε ανταλλαγή μάζας μεταξύ της ζώνης αναπληρώσεως και της υπόλοιπης παράκτιας ζώνης, με αποτέλεσμα την απώλεια υλικού.

Σε ακτές που η απώλεια ιζήματος είναι ιδιαίτερα έντονη, ίσως κριθεί αναγκαία η κατασκευή έργων συγκρατήσεως του ιζήματος και σταθεροποίησης της διατομής της παράκτιας ζώνης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τέτοια έργα μπορεί να είναι ύφαλοι ή διάτρητοι κυματοθραύστες που επιτρέπουν διερχόμενη συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας. Η κατασκευή ύφαλου αναβαθμού έχει ευεργετικά αποτελέσματα, καθώς επιβραδύνει τη μεταφορά μάζας από τη ζώνη αποσβέσεως στη ζώνη πριν από τη θραύση. Πολλές φορές στο τμήμα που αποτίθεται το δάνειο υλικό χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα με κυματοθραύστες και βυθισμένοι ή διάτρητοι πρόβολοι στα ανάντη και κατάντη, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ένα είδος παράκτιου «κελιού» στο οποίο συγκρατείται το υλικό και διανέμεται ομοιόμορφα στην προστατευόμενη περιοχή. Ταυτόχρονα, λόγω των ανοιγμάτων κυματοθραυστών και προβόλων ανανεώνεται επαρκώς και το νερό της προστατευόμενης λεκάνης. Η συγκεκριμένη μέθοδος καλείται «καλλιέργεια» ακτής (beach nourishment).

Ο χώρος και ο τρόπος που θα γίνει η εναπόθεση του υλικού παίζουν το δικό τους ρόλο στον τρόπο απόκρισης της παράκτιας ζώνης. Η εναπόθεση μπορεί να γίνει με χρήση βυθοκόρων, οι οποίες θα αντλούν υλικό από μία γειτονική περιοχή με περίσσεια ιζήματος (ζώνες προσάμμισης στα ανάντη παράκτιων έργων, συσσωρεύσεις στις εισόδους λιμενικών εγκαταστάσεων, κ.ά.) και θα το απορρίπτουν στα όρια της ζώνης αποσβέσεως της προστατευόμενης ακτής. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η κίνηση του υλικού γίνεται με πλωτά μέσα που λειτουργούν κάνοντας στην ουσία αποδοτικότερη εργασία, συνδυάζοντας τη βυθοκόρηση με την αναπλήρωση στις περιοχές που χρειάζονται. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη λύση δεν αυξάνει το πλάτος της ζώνης αναψυχής και δεν επιδρά ουσιαστικά στο προφίλ της παραλίας, αφού το υλικό τοποθετείται σε μεγαλύτερα βάθη.



Εικόνα 3.6 Βυθοκόρος σε διαδικασία απόρριψης ιζήματος για αναπλήρωση ακτής (www.escp.org.uk)

Μία διαφορετική προσέγγιση στην αναπλήρωση της ακτής μπορεί να γίνει εάν το ίζημα μεταφέρεται με μηχανικά μέσα και αποτίθεται υψηλότερα από τη μέγιστη στάθμη θάλασσας, δηλαδή ακριβώς στα όρια της ζώνης διαβροχής προς την ξηρά. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη προστασία της ενδοχώρας, εφόσον αυξάνεται το ύψος στάθμης των αμμόλοφων, και αυξάνεται η θωράκιση της ακτογραμμής έναντι σεναρίων καταγίδας. Το μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση, όμως, είναι ότι παραμελείται ο παράκτιος χώρος και αυξάνεται η κλίση του παράκτιου προφίλ.

Συμπερασματικά, το σημαντικότερο στοιχείο στη μέθοδο αναπλήρωσης είναι η διατήρηση της ισορροπίας της παράκτιας ζώνης. Με τη διατήρηση του ισοζυγίου απωλειών και αποθέσεων στην ακτή αυξάνει η απόδοση του έργου αναπλήρωσης και αποφεύγεται η αστοχία. Η οικονομικότητα σε αυτή τη μέθοδο, η όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση των διατιθέμενων πόρων, η αποφυγή ζημιολόγων αστοχιών και η εναρμόνιση με το περιβάλλον είναι τα στοιχεία εκείνα που θα καθορίσουν, σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, την τελική επιτυχία του έργου για την προστασία της ακτής έναντι διάβρωσης.

3.6 Μέθοδος sand by-pass για την προστασία ακτών στα κατάντη λιμένων

Η μέθοδος sand by-pass χρησιμοποιείται στη γειτονία λιμενικών έργων για την αντιμετώπιση του φαινομένου διαβρώσεως που παρατηρείται στα κατάντη των έργων και οφείλεται στη διαταραχή της ισορροπίας της παράκτιας ζώνης, που προκαλείται από την κατασκευή του λιμένα. Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο εδάφιο, με την κατασκευή σχεδόν οποιουδήποτε παράκτιου τεχνικού έργου σε μία ακτογραμμή δημιουργείται συσσώρευση ιζήματος στα ανάντη και διάβρωση στα κατάντη. Είναι γεγονός, επίσης, ότι στις εισόδους των λιμενικών εγκαταστάσεων παρατηρείται προσάμμωση, η οποία πολλές φορές εάν είναι μεγάλης έκτασης δημιουργεί όχληση στον δίαυλο εισόδου/εξόδου των πλοίων στο λιμένα. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι αρκετές φορές να απαιτείται η χρήση βυθοκόρων για την ασφαλή συνέχιση λειτουργίας των λιμένων και την αποφυγή αστοχίας των έργων.

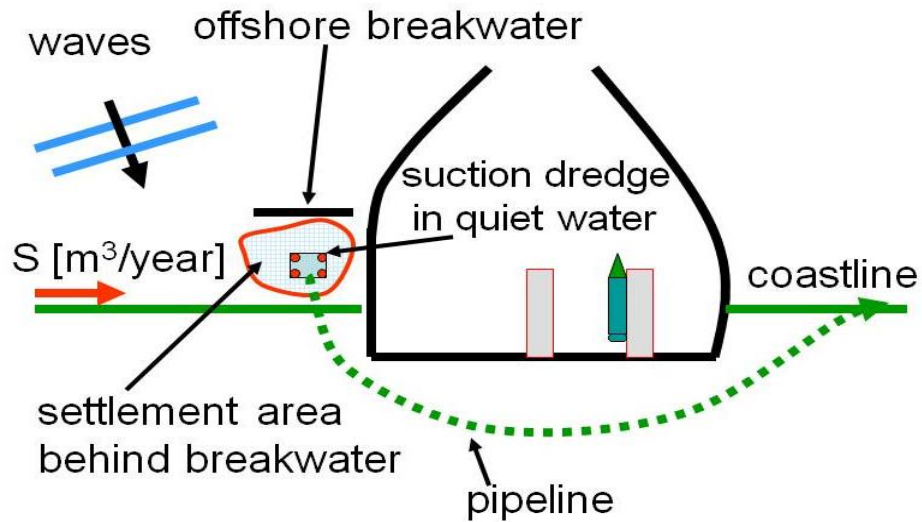
Ο μηχανισμός λειτουργίας της μεθόδου sand by-pass είναι αρκετά απλός και έχει ως στόχο να προσομοιάσει την κίνηση του ιζήματος κατά μήκος της ακτής, σαν να μην υπήρχε το τεχνικό έργο. Αποτελεί, ουσιαστικά, μία «παράκαμψη» του τεχνικού έργου για την κίνηση του ιζήματος, έχοντας ως βάση το ισοζύγιο στερεομεταφοράς ιζήματος από τα ανάντη στα κατάντη. Με μηχανικά μέσα (όπως αντλίες, βυθοκόρους, κλπ.) είναι δυνατή η μετακίνηση ιζήματος από τα ανάντη ή από την είσοδο του λιμένα όπου παρατηρείται συσσώρευση και η εναπόθεσή του στο τμήμα που πλήττεται από τη διάβρωση. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μία ειδική περίπτωση αναπλήρωσης ακτής που λειτουργεί αντιμετωπίζοντας, παράλληλα, φαινόμενα προσάμμωσης σε γειτονικές ζώνες και αποτελεί μία αρκετά ήπια (δεν απαιτεί δομικές κατασκευές) μέθοδο προστασίας της παράκτιας ζώνης. Βέβαια, κρίνεται οικονομικά επιβαρυντική και ίσως δεν θα ήταν αποδοτική για έργα μικρού μεγέθους και προϋπολογισμού. Όμως, σε μεγάλες λιμενικές εγκαταστάσεις και μεγαλύτερης κλίμακας κατάντη διαβρώσεις δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Ιδιαίτερα σε παράκτιες ζώνες με κυρίαρχη συνιστώσα στερεομεταφοράς την παράλληλη στην ακτή, αξίζει να εξετασθεί η επιλογή της μεθόδου sand by-pass. Τέλος, σε παράκτια έργα με αυξημένο κίνδυνο αστοχίας λόγω του ιζήματος, στα οποία κρίνεται σε μεγάλο βαθμό η αποτελεσματικότητα του έργου από το πώς θα αποκριθεί η παράκτια στερεομεταφορά, η μέθοδος sand by-pass μπορεί να δώσει σημαντικές λύσεις.

Η μεταφορά του ιζήματος μπορεί να γίνει είτε με σταθερές, είτε με κινητές εγκαταστάσεις βυθοκόρησης στα ανάντη. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να κατασκευαστεί μία σταθερή πλατφόρμα βυθοκόρησης στο σημείο συσσώρευσης του ιζήματος ή το μηχάνημα εκσκαφής να εδράζεται επάνω σε πλωτή κινητή προβλήτα. Για ένα πλωτό σύστημα μπορεί να επιλεγεί μία βυθοκόρος αναρροφήσεως ή μία βυθοκόρος χοάνη. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το σημείο εναπόθεσης του υλικού στα κατάντη. Απαιτεί σωστή μελέτη για να αποφευχθεί η περίπτωση έμφραξης της εισόδου του λιμένα από το υλικό και της παρεμπόδισης της ομαλής κίνησης των πλοίων.

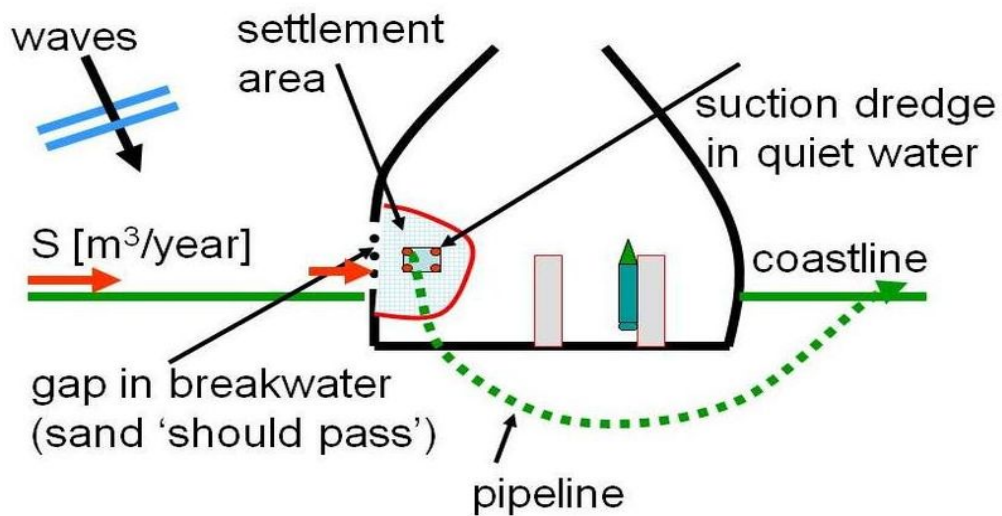
Το πρώτο μέλημα στο σχεδιασμό μίας μεθόδου sand by-pass είναι να υπολογισθεί η απαιτούμενη ποσότητα ιζήματος που θα μεταφερθεί στο τμήμα που προσβάλλεται από τη διάβρωση. Υπάρχουν αρκετά αριθμητικά και φυσικά μοντέλα για την εκτίμηση της ποσότητας, αλλά όλα εξαρτώνται από την ικανοποιητική και ρεαλιστική ακρίβεια των δεδομένων εισόδου, όπως τα κυματικά δεδομένα, οι παράμετροι του ιζήματος, η βαθυμετρία

κλπ. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το αποτέλεσμα μίας θεωρητικής μεθόδου υπολογισμού του απαιτούμενου μεταφερόμενου ιζήματος είναι αρκετά επισφαλές. Μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερδιαστασιολόγηση, είτε σε υποδιαστασιολόγηση του έργου και αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα των διαδικασιών. Μία αναφορά της Holmberg Technologies ισχυρίζεται ότι στον υπολογισμό του μεταφερόμενου υλικού δεν αρκεί ο υπολογισμός του ισοζυγίου ανάντη και κατάντη, αλλά και ο υπολογισμός του ιζήματος που χάνεται προς τα ανοικτά λόγω της κίνησης των πλοίων και των απαραίτητων βυθοκορήσεων κοντά στο κανάλι εισόδου του λιμένα. Μία εναλλακτική λύση, η οποία δίνει ασφαλώς πιο βάσιμα αποτελέσματα, είναι αφού κατασκευασθεί το λιμενικό έργο να υπολογισθεί η πραγματική ποσότητα ιζήματος που έχει ανάγκη η υπό διάβρωση περιοχή. Έτσι οι εγκαταστάσεις αναπλήρωσης μπορούν να κατασκευασθούν με πραγματικά δεδομένα, αλλά καθυστερεί η προστασία της ακτής (PIANC, 2009).

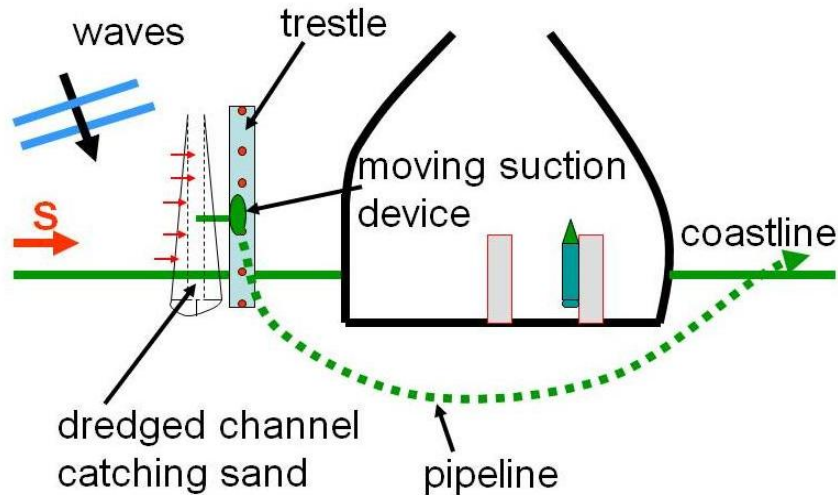
Το δεύτερο σημαντικό στοιχείο είναι ο τρόπος συλλογής του υλικού από τα σημεία συσσώρευσης. Η προσάμμωση θα συμβεί σε μία εκτεταμένη περιοχή. Είναι απαραίτητο λοιπόν να υπάρχει μία κινητή αντλία που θα μαζεύει υλικό από διάφορες θέσεις. Σε διαφορετική περίπτωση, αν ο μηχανισμός συλλογής υλικού είναι σταθερός, πρέπει να παρθούν μέτρα συσσώρευσης του υλικού κοντά στο μηχανισμό για την ευκολότερη απορρόφηση. Τέτοια μέτρα μπορούν να είναι μικροί κυματοθραύστες (έξαλλοι ή ύφαλοι) στα ανάντη του λιμενικού έργου, οι οποίοι θα οδηγούν το ίζημα να συσσωρεύεται στην υπήνεμη πλευρά τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Μία άλλη λύση είναι η κατασκευή ενός μικρού διάκενου στον εξωτερικό λιμενοβραχίονα, μέσα στο οποίο θα συσσωρεύεται το ίζημα που αποτίθεται στα ανάντη και από εκεί θα αντλείται (Σχήμα 3.7). Για την αποφυγή κατασκευής κυματοθραύστη ή κενού στο λιμενοβραχίονα, λύσεις οι οποίες μπορεί να μοιάζουν ασύμφωτες και επιβαρυντικές, θα μπορούσε στον παράκτιο χώρο ανάντη του λιμένα να κατασκευαστεί ειδικό σκάμμα συλλογής ιζήματος και παράπλευρη ελαφρά εγκατάσταση συλλογής του υλικού. Αυτό πραγματοποιείται κατασκευάζοντας ένα ικρίωμα κατά μήκος του σκάμματος, επάνω στο οποίο μπορούν να κινούνται μηχανήματα για την αναρρόφηση του υλικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Η επί τόπου εκσκαφή του υλικού σε περιόδους άμπωτης και μεταφορά του με βυθοκόρους είναι δύσκολη και ανεπαρκής μέθοδος. Δεδομένου ότι οι θέσεις συσσώρευσης και διάβρωσης είναι σε σχετικά ρηγά νερά και σε σημεία που η κυματική ενέργεια μεγιστοποιείται, είναι ιδιαίτερα δύσκολο το περιβάλλον εργασίας για μία παραδοσιακή βυθοκόρο (PIANC, 2009).



Σχήμα 3.6 Παγίδα ιζήματος στην υπήνεμη πλευρά κυματοθραύστη (Marine Biodiversity, 2013)



Σχήμα 3.7 Διάκενο για τη συσσώρευση ιζήματος μέσα στη λιμενολεκάνη (Marine Biodiversity, 2013)



Σχήμα 3.8 Συλλογή ιζήματος από σκάμμα με τη βοήθεια ικρίωματος (Marine Biodiversity, 2013)

Το τρίτο πρόβλημα που πρέπει να ξεπερασθεί είναι ο καλύτερος τρόπος μεταφοράς του υλικού στα σημεία που δέχονται διάβρωση. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί παραδοσιακά μέσω οδικής σύνδεσης και με τη χρήση φορτηγών για τη μεταφορά. Μία λύση, ωστόσο, που θα απαιτούσε συχνές μετακινήσεις και πολλά διαθέσιμα φορτηγά σε ένα έργο μεγάλης κλίμακας. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται αυξημένες δαπάνες, διατάραξη της οδικής κυκλοφορίας και υψηλές εκπομπές καυσαερίων στην, ήδη επιβαρυνόμενη περιοχή, γύρω από ένα λιμένα. Για αυτό το λόγο ίσως θα ήταν προτιμότερο να κατασκευασθεί ένας αγωγός μεταφοράς του υλικού από τα σημεία συλλογής στα σημεία εκβολής, είτε λαμβάνοντας τη θαλάσσια διαδρομή γύρω από το λιμενικό έργο, είτε μέσω της ξηράς αν ευνοούν η τοπογραφία, οι εγκαταστάσεις υποδομής και οι χρήσεις γης. Στην Εικόνα 3.7 φαίνεται αγωγός μεταφοράς μέσω της θαλάσσιας οδού σε σύστημα sand by-pass στο συγκρότημα Tweed River της Αυστραλίας (PIANC, 2009).



Εικόνα 3.7 Αγωγός μεταφοράς ιζήματος σε σύστημα sand by-pass στο Tweed River της Αυστραλίας (www.tweedsandbypass.nsw.gov.au)

Συνοψίζοντας, η μέθοδος sand by-pass είναι μία νέα αντίληψη στο σχεδιασμό έναντι διάβρωσης, με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Είναι μία ήπια μέθοδος προστασίας, φιλική προς το περιβάλλον και χωρίς να απαιτεί μεγάλα δομικά έργα. Δεν έχει δοκιμασθεί ακόμη εκτεταμένα σε πραγματικές περιπτώσεις, έτσι ώστε να μπορούν να αξιολογηθούν με σιγουριά τα αποτελέσματά της. Παρόλα αυτά, αξίζει να εξετασθεί σε προβλήματα διάβρωσης κοντά σε μαρίνες και λιμένες και σε παράκτιες περιοχές, όπου αποφεύγεται να επιβαρυνθεί το φυσικό περιβάλλον από τυχόν κατασκευές προστασίας. Με καλή μελέτη και εκτίμηση των μηχανισμών που δρουν στην παράκτια ζώνη και των παραμέτρων που υπεισέρχονται στη στερεομεταφορά μπορεί να δώσει αποτελεσματικές και αποδοτικές λύσεις έναντι διαβρώσεως.

4. Πρόγραμμα MIKE 21 DHI

4.1 Κυματικό μοντέλο PMS

Το MIKE 21 PMS είναι ένα γραμμικό μοντέλο διάθλασης – περίθλασης, το οποίο βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης (Mild Slope Equation). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν τα φαινόμενα της διάθλασης και της ρήχωσης, εξαιτίας της μεταβολής του πυθμένα, της περίθλασης κατά μήκος της καθέτου στην κύρια διεύθυνση των κυματισμών και των ενεργειακών απωλειών, εξαιτίας της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών. Ακόμη, το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της διασποράς συχνοτήτων και της κατευθυντικής διάδοσης χρησιμοποιώντας γραμμική επαλληλία.

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι, όπως η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος (H_{rms}), η περίοδος αιχμής (T_p) και η μέση κατεύθυνση των κυματισμών (θ), καθώς επίσης και οι τάσεις ακτινοβολίας (S_{xx} , S_{xy} , S_{yy}), οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία κυματογενών ρευμάτων. Το MIKE 21 PMS χρησιμοποιείται στη μελέτη του κυματικού πεδίου μίας ανοιχτής παράκτιας περιοχής καθώς και σε περιοχές όπου υπάρχουν τεχνικά έργα (π.χ. πρόβολοι, κυματοθραύστες), όταν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ανάκλαση των προσπιπτόντων κυματισμών και η περίθλαση είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνσή τους. Όπως σε όλες τις παραβολικές προσεγγίσεις, έτσι και σε αυτό το μοντέλο δεν περιγράφονται η περίθλαση και η ανάκλαση με ακρίβεια (η περίθλαση κατά τη διεύθυνση x θεωρείται αμελητέα, καθώς επίσης και η διάχυση στη σκιά των έργων (back-scatter)). Επομένως, το μοντέλο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η περίθλαση αποτελεί το πιο σημαντικό φαινόμενο στην περιοχή μελέτης, όπως για παράδειγμα στα λιμάνια, αν σκοπός είναι να εξετασθεί η κυκλοφορία στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Τα φαινόμενα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου είναι:

- η ρήχωση (shoaling)
- η διάθλαση (refraction)
- η περίθλαση (diffraction)
- η ανάκλαση (reflection)
- η τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- η θραύση (wave breaking)
- η γένεση των κυματισμών λόγω ανέμου (wind generation)
- η διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- η κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- η αλληλεπίδραση μεταξύ των κυματισμών (wave-wave interaction) και η αλληλεπίδραση κύματος – ρεύματος (wave-current interaction)

4.1.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

Το MIKE 21 PMS βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης με την οποία περιγράφονται η διάθλαση, η περίθλαση και η ανάκλαση των γραμμικών αρμονικών κυματισμών σε μια παράκτια περιοχή με ήπια κλίση πυθμένα. Η εξίσωση αυτή παρουσιάστηκε πρώτα από τον Berckhoff το 1972.

Η ελλειπτική εξίσωση ήπιας κλίσης γράφεται ως εξής:

$$\nabla(CC_g \nabla \varphi) + (k^2 CC_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (4.1)$$

όπου $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ δισδιάστατος τελεστής κλίσης, $C(x,y)$ η φασική ταχύτητα, $C_g(x,y)$ η ταχύτητα ομάδας κυματισμών, $\varphi(x,y)$ το δυναμικό ταχύτητας της μέσης ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο συνδέεται με το δυναμικό της ταχύτητας με την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} \varphi(x, y) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad (4.2)$$

όπου $k = 2\pi/L$ ο κυματαριθμός, με L το μήκος κύματος, z η ανύψωση της στάθμης του νερού μετρημένη από τη μέση στάθμη, d το βάθος του νερού, $\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα, με f τη συχνότητα, $W = E_{diss}/E_m$ όρος διάχυσης με E_{diss} να απεικονίζει το μέσο ρυθμό διάχυσης της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας και E_m η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας.

Επίσης σημειώνεται ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (η) μπορεί να γραφεί ως (Dean & Darymple, 1984):

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \text{ για } z = 0 \quad (4.3)$$

$$\eta = \varphi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (4.4)$$

Για διαδιδόμενους κυματισμούς μίας κατεύθυνσης, το δυναμικό της μέσης ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται από τη σχέση:

$$\varphi = A^*(x, y) e^{i\psi} \quad (4.5)$$

$$\psi = \int^x k \cos \theta dx + \int^y k \sin \theta dy \quad (4.6)$$

όπου θ η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών με τον άξονα x . Θεωρώντας ότι οι επικρατέστεροι κυματισμοί διαδίδονται κατά μήκος του άξονα x η συνάρτηση ψ μπορεί να γραφτεί $\psi = \int^x k dx$.

Μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης (4.1) προκύπτει θεωρώντας ως επικρατούσα διεύθυνση των κυματισμών τη διεύθυνση x και αμελητέα τα φαινόμενα διασποράς και περίθλασης κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Η ελλειπτική εξίσωση μπορεί να μετατραπεί στην:

$$(CC_g \varphi_x)_x + (CC_g \varphi_y)_y + (k^2 CC_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (4.7)$$

όπου οι δείκτες x, y εκφράζουν παραγώγους ως προς την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψιν την εξίσωση (4.5) οι όροι κλίσης μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\varphi_x = (ikA^* + A_x^*)e^{i\psi} \quad (4.8)$$

$$CC_g \varphi_x = (i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*)e^{i\psi} \quad (4.9)$$

$$(CC_g \varphi_x)_x = \left[ik(i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) + i\omega C_g A_x^* + i\omega A^* (C_g)_x + (CC_g A_x^*)_x \right] e^{i\psi} \quad (4.10)$$

Ο τελευταίος όρος $(CC_g A_x^*)_x$ της Σχέσης 4.10 εκφράζει την επίδραση της διασποράς και της περίθλασης κατά μήκος της διεύθυνσης x και επομένως παραλείπεται στην παραβολική προσέγγιση. Έτσι:

$$(CC_g \varphi_x)_x \cong [\{-k\omega C_g + i\omega (C_g)_x\} A^* + 2i\omega C_g A_x^*] e^{i\psi} \quad (4.11)$$

Τελικά, χρησιμοποιώντας τη σχέση της μέσης ελεύθερης στάθμης (4.5) προκύπτει:

$$(CC_g \varphi_y)_y = (CC_g A_y^*)_y e^{i\psi} \quad (4.12)$$

Αντικαθιστώντας τις δύο τελευταίες σχέσεις στην (4.7) προκύπτει:

$$A_x^* - \frac{i}{2\omega C_g} = (CC_g A_y^*)_y + A^* \frac{(C_g)_x}{2C_g} + A^* \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.13)$$

Με την υπόθεση ότι $\varphi = A(x, y)e^{ik_0 x}$, όπου k_0 είναι ένας κυματαριθμός αναφοράς και $A(x, y)$ μια σύνθετη μεταβλητή. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι:

$$A^*(x, y) = A(x, y)e^{i\theta} \quad (4.14)$$

όπου $\theta = k_0 x - \int^x k dx$. Έτσι, η Σχέση (4.13) γράφεται:

$$A_x - i(k - k_0)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y)_y + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.15)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την απλούστερη παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης και ισχύει για διάδοση κυματισμών κατά μήκος μιας επικρατούσας διεύθυνσης (θετικός ημιάξονας x) ή υπό μικρή γωνία ως προς τον άξονα x . Ο Kirby (1986) τροποποίησε την τελευταία σχέση ώστε να ισχύει και στην περίπτωση διάδοσης κυματισμών υπό μεγαλύτερη γωνία και παρήγαγε την εξίσωση:

$$A_x - i(k_0 - \beta_1 k)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} (CC_g A_y)_y - \frac{\sigma_2}{\omega C_g} (CC_g A_y)_{yx} + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.16)$$

όπου σ_1 και σ_2 δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma_1 = i(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k}) + (\frac{k_x}{k^2} - \frac{(C_g)_x}{2kC_g}) \tag{4.17}$$

$$\sigma_2 = -\frac{\beta_3}{k} \tag{4.18}$$

Οι τιμές των συντελεστών β_1 , β_2 και β_3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 για διαφορετικές παραβολικές προσεγγίσεις. Σημειώνεται, ότι η Σχέση 4.16 ονομάζεται παραβολική εξίσωση ήπιας κλίσης, και είναι η βασική εξίσωση επίλυσης του κυματικού μοντέλου MIKE 21 PMS.

Πίνακας 4.1 Τιμές συντελεστών β_1 , β_2 και β_3 της εξίσωσης ήπιας κλίσης (μοντέλο PMS, DHI, 2012)

Aperture	β_1	β_2	β_3
Simple	1	-0.50	0
Pade	1	-0.75	-0.25
10°	0.999999972	-0.752858477	-0.252874920
20°	0.999998178	-0.761464683	-0.261734267
30°	0.999978391	-0.775898646	-0.277321130
40°	0.999871128	-0.796244743	-0.301017258
50°	0.999465861	-0.822482968	-0.335107575
60°	0.985273164	-0.854229482	-0.383283081
70°	0.994733030	-0.890064831	-0.451640568
80°	0.985273164	-0.925464479	-0.550974375
90°	0.956311082	-0.943396628	-0.704401903

4.1.2 Βασικές παράμετροι μοντέλου

Θραύση κυματισμών

Το φαινόμενο της θραύσεως οφείλεται στην υδροδυναμική αστάθεια των κυματισμών. Στην ανοιχτή θάλασσα, η αστάθεια αυτή εκφράζεται με μια κρίσιμη τιμή της καμπυλότητας (H/L) των κυματισμών, ενώ στα ρηχά νερά με μια κρίσιμη τιμή του λόγου του ύψους κύματος προς το βάθος του νερού (H/d). Στο MIKE 21 PMS η θραύση των κυματισμών βασίζεται στο μοντέλο των Battjes & Janssen (1978), σύμφωνα με το οποίο ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών εξαιτίας της θραύσης είναι:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{a}{8\pi} Q_b \omega H_{\max}^2 \quad (4.19)$$

όπου E η συνολική ενέργεια, ω η κυκλική συχνότητα, Q_b το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών και a μια σταθερά από την οποία ελέγχεται ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας. Στην παραπάνω εξίσωση H_{\max} είναι το μέγιστο επιτρεπτό ύψος των κυματισμών και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_{\max} = \gamma_1 k^{-1} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kd}{\gamma_1}\right) \quad (4.20)$$

όπου $k = 2\pi/L$ ο κυματαριθμός, d το βάθος του νερού, γ_1 μια παράμετρος της θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας και γ_2 μια άλλη παράμετρος που έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους. Σημειώνεται, ότι η παραπάνω έκφραση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών κατά τη θραύση τους χρησιμοποιείται τόσο για μονοχρωματικούς, όσο και για τυχαίους κυματισμούς.

Τριβή στον πυθμένα

Η τριβή στον πυθμένα συνεπάγεται απώλεια ενέργειας του κύματος. Το φαινόμενο είναι αθροιστικό και το ποσό της απολεσθείσας ενέργειας αυξάνεται με την απόσταση, το ύψος κύματος και την περίοδο ενώ μειώνεται με το βάθος. Το MIKE 21 PMS, όσον αφορά την απώλεια ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα, χρησιμοποιεί την ακόλουθη σχέση για μονοχρωματικούς κυματισμούς:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{6\pi} \frac{c_{fw}}{g} \left(\frac{\omega H}{\sinh(kd)}\right)^3 \quad (4.21)$$

όπου $E = H_{rms}^2 / 8$ η συνολική ενέργεια του κύματος και $c_{fw} = f_w / 2$ ο παράγοντας τριβής που προσδιορίζεται από την εξής σχέση (Swart, 1974):

$$f_w = 0,24 \quad , \text{για } a_\beta / k_N < 2 \quad (4.22\alpha)$$

$$f_w = e^{-5,977+5,213(a_\beta/k_N)^{-0,194}} \quad , \text{για } a_\beta / k_N \geq 2 \quad (4.22\beta)$$

Όπου k_N η τραχύτητα κατά Nikuradse και a_β το εύρος της κίνησης σωματιδίου στον πυθμένα. Τέλος, για τυχαίους κυματισμούς, ο ρυθμός απώλειας ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{8\sqrt{\pi}} \frac{c_{fw}}{g} \left(\frac{\omega H_{rms}}{\sinh(kd)}\right)^3 \quad (4.23)$$

Κυματικές παράμετροι

Από τους υπολογισμούς του μοντέλου προκύπτουν οι τρεις ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι: η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος H_{rms} , η περίοδος αιχμής T_p και η μέση διεύθυνση θ του κύματος. Η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος H_{rms} και το σημαντικό ύψος κύματος H_{m0} ορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$H_{rms} = 2\sqrt{2E_1} \quad (4.24)$$

$$H_{m0} = 4\sqrt{4E_1} \quad (4.25)$$

όπου E_1 η ολική κυματική ενέργεια που δίνεται από την εξής σχέση:

$$E_1 = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} E(f, \theta) df d\theta \quad (4.26)$$

όπου θ_{\max} και θ_{\min} τα όρια της διεύθυνσης του κυματισμού και f_{\max} και f_{\min} το ανώτατο και το κατώτατο όριο, αντίστοιχα, για την κυματική συχνότητα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ενεργειακού φάσματος. Η περίοδος αιχμής T_p ορίζεται ως η περίοδος μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας.

Η μέση διεύθυνση κύματος θ ορίζεται ως:

$$\theta = \arctan(b / a) \quad (4.27)$$

όπου a , b σταθερές που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$a = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \cos \theta E(\theta) d\theta \quad (4.28)$$

$$b = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \sin \theta E(\theta) d\theta \quad (4.29)$$

Από το κυματικό μοντέλο MIKE 21 PMS προκύπτουν επίσης οι τρεις συνιστώσες των τάσεων ακτινοβολίας S_{xx} , S_{yy} και S_{xy} οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των κυματογενών ρευμάτων. Οι τάσεις ακτινοβολίας ορίζονται από τις σχέσεις:

$$S_{xx} = \rho \frac{g}{2} (F_u + F_p) \quad (4.30\alpha)$$

$$S_{yy} = \rho \frac{g}{2} (F_v + F_p) \quad (4.30\beta)$$

$$S_{xy} = \rho \frac{g}{2} F_{uv} \quad (4.30\gamma)$$

Οι δυνάμεις F δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$F_u = \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta (1+G) E(\theta) d\theta \quad (4.31)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta (1+G) E(\theta) d\theta \quad (4.32)$$

$$F_{uv} = \int_0^{2\pi} \cos \theta \sin \theta (1+G) E(\theta) d\theta \quad (4.33)$$

$$F_p = \int_0^{2\pi} G E(\theta) d\theta \quad (4.34)$$

Με την παράμετρο G να δίνεται από την εξής σχέση:

$$G = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \quad (4.35)$$

Τέλος, από το μοντέλο προκύπτουν οι συνιστώσες ενός διανύσματος ταχύτητας $U(u,v)$ που απεικονίζει τη μέση διεύθυνση κύματος στην περιοχή μελέτης, οι οποίες δίνονται στην ακόλουθη σχέση:

$$u = H_{m0} \cos \theta \quad (4.36)$$

$$v = H_{m0} \sin \theta \quad (4.37)$$

4.1.3 Εφαρμογή μοντέλου

Βασικές παράμετροι (Basic Parameters)

Κατ' αρχάς, όσον αφορά την καρτέλα των βασικών παραμέτρων (Basic parameters), εισάγεται η δημιουργηθείσα βαθυμετρία στο μοντέλο. Επιλέγεται προσομοίωση σε δύο διαστάσεις, ήτοι normal simulation, και εν συνεχεία δίνονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη εργασία, επειδή πρόκειται για φανταστική περιοχή, επιλέγεται γεωγραφικό μήκος και πλάτος ίσο με το μηδέν. Επίσης, εκλέγονται τα 10m ως τιμή ύψους πάνω από το οποίο θεωρείται στεριά. Τέλος, εξετάζεται το φαινόμενο απαλλαγμένο από την έννοια του χρόνου, θεωρώντας την περίοδο προσομοίωσης στάσιμη (stationary), δηλαδή θεωρώντας μόνο ένα κυματικό γεγονός προερχόμενο από το Δυτικό όριο (Offshore boundary).

Συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions)

Η επόμενη καρτέλα αφορά τις συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions), δηλαδή το Δυτικό-ανοιχτό όριο από το οποίο γεννιέται ο κυματισμός καθώς και τα πλευρικά όρια που βρίσκονται στο Βόρειο και το Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Σημειώνεται εδώ, ότι η επιλογή των συνοριακών συνθηκών σε μια προσομοίωση, είναι βαρύνουσας σημασίας, θεωρείται μάλιστα ότι είναι η πιο σημαντική διαδικασία μετά από τον καθορισμό της βαθυμετρίας. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι, στο κυματικό μοντέλο PMS, συνίσταται να τοποθετείται η ακτή στα ανατολικά της παράκτιας περιοχής. Στην παρούσα εργασία, θεωρούνται τυχαίοι κυματισμοί, με το μοντέλο να απαιτεί σε αυτό το σημείο την εισαγωγή της μέσης τετραγωνικής ρίζας του ύψους κύματος H_{rms} , της περιόδου αιχμής T_p και μέσης κατεύθυνσης των κυματισμών θ στα βαθειά. Όσον αφορά τα πλευρικά όρια, υπάρχει η επιλογή να είναι απορροφητικά (absorbing), δηλαδή οι κυματισμοί να απορροφώνται πλήρως από αυτά, ανακλαστικά (reflecting), με τους προσπίπτοντες κυματισμούς να ανακλώνται πλήρως ή συμμετρικά (symmetrical) θεωρώντας ότι η μεταβολή των κυματισμών κατά μήκος αυτών είναι μηδενική. Στην παρούσα εφαρμογή, όπως συνίσταται από το εγχειρίδιο του προγράμματος, εκλέγεται η τρίτη επιλογή.

Παράμετροι μοντέλου (Model Parameters)

Εν συνεχεία, προσδιορίζονται οι παράμετροι που αφορούν το μοντέλο στην αντίστοιχη καρτέλα (Model Parameters). Κατ' αρχάς, επιλέγεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας σταθερή και ίση με το μηδέν, αφού δεν υπάρχουν δεδομένα προς χρήση. Έπειτα, προσδιορίζεται ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης που χρησιμοποιείται για την επίλυση

της εξίσωσης της ήπιας κλίσης, ανάλογα με τις τιμές των συντελεστών β_1 , β_2 , β_3 της Σχέσης 4.16. Παρέχεται η δυνατότητα χρήσης τριών τύπων. Ο πρώτος περιλαμβάνει το λεγόμενο απλό μοντέλο (Simple model), κατάλληλο για περιπτώσεις στις οποίες η γωνία μεταξύ του θετικού οριζόντιου άξονα και της διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού δεν ξεπερνά τις 10° . Για εύρη γωνιών που φτάνουν τις 45° (Kirby, 1986), χρησιμοποιείται το μοντέλο Pade' s, ενώ το μοντέλο Minimax ελαχιστοποιεί τα σφάλματα για δεδομένα εύρη. Για παράδειγμα, το Minimax 60, ελαχιστοποιεί τα σφάλματα για κυματισμούς που διαδίδονται σε γωνία 60° . Επισημαίνεται όμως, ότι μπορεί να υπάρχουν σφάλματα για μικρότερες γωνίες. Επίσης, το εγχειρίδιο δεν συνιστά τη χρήση για μεγαλύτερα εύρη από 60° , αλλά προτείνει τη στρέψη του μοντέλου, ώστε ο κυματισμός να έρχεται με μικρότερη γωνία στην περιοχή μελέτης. Τέλος, σημειώνεται ότι πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην προσέγγιση αυτή, καθώς σφάλματα που μπορεί να μην είναι ορατά στο PMS μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ μεγαλύτερα, όσον αφορά τη μετέπειτα υδροδυναμική ανάλυση. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, τα δεδομένα κυματικά σενάρια και μετά από δοκιμές, αποφασίστηκε η χρήση του μοντέλου Pade' s. Ακόμα, χρησιμοποιείται, όπως συνίσταται, φίλτρο 0,25 (προεπιλεγμένη τιμή) για να εξομαλυνθούν οι αστάθειες λόγω των απότομων μεταβολών του ύψους κύματος κατά τη θραύση. Όσον αφορά την τριβή στον πυθμένα, επιλέχθηκε να ληφθεί υπ' όψιν. Λόγω αμμόδους ακτής, με μέση διάμετρο κόκκου $D_{50} = 1 \text{ mm}$ υπολογίζεται η σταθερή τραχύτητα Nikuradse από την εξής σχέση:

$$k_N = 2,5D_{50} \quad (4.38)$$

Η τραχύτητα προκύπτει $k_N = 0,0025 \text{ m}$. Τέλος, όσον αφορά τη θραύση, χρησιμοποιείται το μοντέλο των Battjes & Janssen (1978) που περιγράφηκε πρωτύτερα, με τις προκαθορισμένες τιμές $\gamma_1 = 1,0$, $\gamma_2 = 0,8$ και $\alpha = 1,0$.

Αποτελέσματα (Output)

Στην τελευταία καρτέλα αποτελεσμάτων (Output), δηλώνονται τα αρχεία αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από το πρόγραμμα. Στη συγκεκριμένη μελέτη, εξάγεται ένα αρχείο που περιλαμβάνει τη μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος H_{rms} (m), τη διεύθυνση διάδοσης θ ($^\circ$) τις ταχύτητες κατά την οριζόντια u (m/s) και την κατακόρυφη διεύθυνση v (m/s) και ένα δεύτερο αρχείο που περιλαμβάνει τις τάσεις ακτινοβολίας S_{xx} , S_{xy} , S_{yy} (m). Τα αρχεία αυτά θα εισαχθούν ως αρχικά δεδομένα (input) στο μοντέλο στερεομεταφοράς ST και στο υδροδυναμικό HD αντίστοιχα.

4.2 Υδροδυναμικό μοντέλο HD

Το MIKE 21 Flow Model είναι ένα μοντέλο υπολογισμού δισδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στην προσομοίωση υδραυλικών και περιβαλλοντικών φαινομένων, σε λίμνες, εκβολές ποταμών, παράκτιες περιοχές και στην ανοιχτή θάλασσα. Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) αποτελεί τη βάση του μοντέλου MIKE 21 Flow Model (FM) καθώς προσομοιώνει τη μεταβολή της στάθμης του νερού και τη ροή, παράγοντας στοιχεία που αποτελούν δεδομένα για άλλα μοντέλα, όπως αυτό της στερεομεταφοράς (ST). Μεταξύ άλλων, μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό των ανεμογενών και κυματογενών

ρευμάτων σε μια παράκτια περιοχή, των κυματικών καταγίδων και τη μοντελοποίηση των παλιρροιών.

Στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη:

- η διατμητική τάση στον πυθμένα (bottom shear stress)
- η διατμητική τάση από τον άνεμο (wind shear stress)
- οι μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης (Barometric pressure gradients)
- η δύναμη Coriolis (Coriolis force)
- η διασπορά της ορμής (momentum dispersion)
- οι παροχές εισόδου και εξόδου (sources and sinks)
- η εξάτμιση (evaporation)
- οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας (flooding and drying)
- οι τάσεις ακτινοβολίας (wave radiation stresses)

4.2.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

Το MIKE 21 HD είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει δισδιάστατες μη μόνιμες ροές (ομογενείς κατά βάθος) σε κάθε σημείο του κανάβου. Οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης κατά x και y, ολοκληρωμένες στο βάθος, περιγράφουν τη ροή και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας και αποτελούν τη βάση για την επίλυση του υδροδυναμικού μοντέλου. Η εξίσωση συνέχειας παρουσιάζεται ακολούθως:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d_t}{\partial t} \quad (4.39)$$

όπου $\eta(x,y,t)$ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, $p,q(x,y,t)$ η ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα. Οι εξισώσεις διατήρησης ποσότητας κίνησης κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, αντίστοιχα, είναι οι εξής:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 d^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fV_w V_{wx} + \frac{d}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (4.40\alpha)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 d^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fV_w V_{wy} + \frac{d}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (4.40\beta)$$

όπου $\eta(x,y,t)$ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (σε m), $d = h - d_t$ το βάθος νερού (σε m), g η επιτάχυνση της βαρύτητας (σε m/s^2), $C(x,y)$ ο συντελεστής Chezy (σε $m^{1/2}/s$), ρ_w η πυκνότητα του νερού (σε kg/m^3), τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} οι ενεργές διατμητικές τάσεις, $\Omega(x,y)$ ο συντελεστής Coriolis εξαρτώμενος από το γεωγραφικό πλάτος (σε s^{-1}), $V_w(x,y,t)$ η ταχύτητα του ανέμου με V_{wx} , V_{wy} τις συνιστώσες της κατά x και y αντίστοιχα (σε m/s), $f(V)$ ο

συντελεστής τριβών ανέμου, p_a η ατμοσφαιρική πίεση (σε kg/m/s^2), x, y οι χωρικές συντεταγμένες (σε m) και t ο χρόνος (σε s). Το MIKE 21 HD χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ADI (Alternating Direction Implicit) για την ολοκλήρωση των εξισώσεων συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης στο χώρο και το χρόνο.

4.2.2 Βασικές παράμετροι μοντέλου

Σε αυτό το εδάφιο περιγράφονται το τυρβώδες ιξώδες (Eddy viscosity), η αντίσταση του πυθμένα (Bed resistance), οι τάσεις ακτινοβολίας (Radiation stresses) και ο τρόπος με τον οποίο τα μεγέθη αυτά συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς του υδροδυναμικού μοντέλου HD.

Κατ' αρχάς, στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης που περιγράφηκαν παραπάνω, η διατμητική τάση στον πυθμένα εμπεριέχει μεταβολές λόγω τύρβης και διακυμάνσεων μικρής κλίμακας των υδάτων. Το παραπάνω φαινόμενο εισάγεται στο μοντέλο ως διατύπωση τυρβώδους ιξώδους E_v που περιγράφει την απόσβεση ταλαντώσεων κυμάτων με μικρό μήκος κύματος L και αντιπροσωπεύει τέτοια φαινόμενα μικρής κλίμακας. Το τυρβώδες ιξώδες εισάγεται στην εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x , είτε σε όρους ορμής, είτε σε όρους ταχύτητας, όπως περιγράφεται στις δύο ακόλουθες σχέσεις αντίστοιχα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E_v \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_v \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (4.41\alpha)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(dE_v \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(dE_v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4.41\beta)$$

όπου p η ορμή στην οριζόντια διεύθυνση και u η ταχύτητα στην οριζόντια διεύθυνση.

Η πρώτη έκφραση είναι πιο ακριβής όταν το βάθος είναι σταθερό, ενώ η δεύτερη σε γενικές περιπτώσεις, αν και ενδέχεται να οδηγήσει σε αριθμητικές αστάθειες, για αυτό το τυρβώδες ιξώδες πρέπει να ακολουθεί το ακόλουθο κριτήριο:

$$\frac{E_v \Delta t}{\Delta x^2} \leq 0,5 \quad (4.42)$$

όπου Δx η ισοδιάσταση του κανάβου και Δt το χρονικό βήμα του μοντέλου. Το τυρβώδες ιξώδες E_v μπορεί να θεωρηθεί σταθερό όπως περιγράφηκε παραπάνω, ή χρονικά μεταβαλλόμενο, σύμφωνα με την εξίσωση του Smagorinsky, η οποία είναι η εξής:

$$E_v = C_s^2 \Delta x^2 \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x}} \quad (4.43)$$

όπου U, V οι μέσες κατά βάθος ταχύτητες στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα και C_s μια σταθερά που παίρνει τιμές μεταξύ 0,25 και 10.

Η αντίσταση R στον πυθμένα περιγράφεται είτε με τον αριθμό Chezy, είτε με τον αριθμό Manning. Και στις δύο περιπτώσεις, η σχέση είναι η εξής:

$$R = \frac{g u |u|}{C^2} \quad (4.44)$$

όπου u η ταχύτητα και C ο αριθμός Chezy, ο οποίος σχετίζεται με τον αριθμό Manning με την ακόλουθη σχέση:

$$C = Md^{1/6} \quad (4.45)$$

4.2.3 Εφαρμογή μοντέλου

Βασικές παράμετροι

Κατ' αρχάς, όσον αφορά την καρτέλα με τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου (Basic Parameters), επιλέγεται το είδος της ανάλυσης, η οποία είναι μόνο υδροδυναμική χωρίς να συνδυάζεται με κάποια άλλη. Εν συνεχεία, εισάγεται το αρχείο της βαθυμετρίας και επιλέγεται να μην υπάρχει επιρροή της δυνάμεως Coriolis (επίδραση περιστροφής της Γης). Ακόμη, με την επιλογή Cold Start, δηλώνεται ότι η μελέτη δεν αποτελεί συνέχεια κάποιας προηγούμενης. Το επόμενο βήμα είναι πολύ σημαντικό για τη μελέτη, καθώς εδώ καθορίζεται το χρονικό βήμα και η χρονική περίοδος προσομοίωσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα η ανάλυση. Κριτήριο για την επιλογή του πρώτου αποτελεί ο αριθμός Courant, ο οποίος σχετίζεται με τη σταθερότητα του μοντέλου. Ο αριθμός Courant Cr δίδεται από τη σχέση:

$$Cr = C \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4.46)$$

όπου Δt το χρονικό βήμα, Δx το αντίστοιχο χωρικό (λαμβάνεται 5 m η διάσταση του κελιού του κανάβου) και C η ταχύτητα που δίνεται από τη σχέση $C=(gd)^{1/2}$, όπου d το βάθος.

Ο μέγιστος αριθμός Cr προκύπτει για το μέγιστο βάθος, το οποίο για την παρούσα εργασία λαμβάνεται 10 m. Γενικά, ο Cr_{max} δεν πρέπει να ξεπερνά το 5. Η τιμή αυτή μπορεί να φτάσει το 20 αν η βαθυμετρία είναι ομαλή. Στην παρούσα εφαρμογή επιλέχθηκε $\Delta t = 3$ s έτσι ώστε $Cr_{max} = 5,95$, η οποία κρίθηκε επαρκής μετά και από δοκιμές. Όσον αφορά την περίοδο προσομοίωσης, αυτή πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να έχουν επιτευχθεί συνθήκες ισορροπίας στο σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψιν το παραπάνω, δοκιμές, τη φύση του εξεταζόμενου φαινομένου και περιόδους προσομοίωσης συναφών παραδειγμάτων εκλέγεται περίοδος προσομοίωσης 4,5 hr. Εκτός αυτού, ενεργοποιείται η επιλογή warm-up period, κατά την οποία οι μεταβλητές αυξάνονται σταδιακά στη μέγιστη τιμή τους, ώστε να αποφευχθούν απότομες αλλαγές στις τιμές των μεταβλητών που δρουν αποσταθεροποιητικά. Τα όρια του μοντέλου, δηλαδή τα εξωτερικά κελιά που απεικονίζουν θάλασσα και στα οποία το μοντέλο θα κάνει υπολογισμούς, ανιχνεύονται από το πρόγραμμα. Στην παρούσα εργασία είναι το Βόρειο, το Δυτικό και το Νότιο όριο αφού σε όλη την ανατολική πλευρά θεωρείται στεριά. Οι επιλογές που αφορούν πηγές και καταβόθρες και αυτή που αφορά τον καθορισμό του ισοζυγίου μάζας παραμένουν ανενεργές αφού δε σχετίζονται με την παρούσα εργασία. Τέλος, όπως συνίσταται από το εγχειρίδιο του προγράμματος, παρά τη απουσία παλιρροιακών ρευμάτων, ενεργοποιείται η επιλογή Flood and Dry με την οποία καθορίζεται ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος τα 0,2 m και το βάθος στο οποίο αυτό λαμβάνεται ξανά υπόψιν στους υπολογισμούς τα 0,3 m.

Υδροδυναμικές παράμετροι (Hydrodynamic Parameters)

Η δεύτερη καρτέλα αφορά τις υδροδυναμικές παραμέτρους (Hydrodynamic Parameters). Ορίζεται σε πρώτη φάση η αρχική στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας ως σταθερή και ίση με το μηδέν, τιμή που πρέπει να συνάδει με την αντίστοιχη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας για το κυματικό μοντέλο PMS. Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, αξίζει να τονισθεί για ακόμη μια φορά η σημασία τους στο τελικό αποτέλεσμα. Γενικά, μπορούν να περιγραφούν αναφορικά με τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (Level) ή με την ποσότητα κίνησης (Flux), δηλαδή την ποσότητα του ρευστού που περνάει το όριο. Παρέχονται διάφορες δυνατότητες για τη συνάρτηση που περιγράφει το όριο, όπως μεταξύ άλλων η τιμή να είναι σταθερή, χρονοσειρά από δεδομένες μετρήσεις, αρχείο κατασκευασμένο από το πρόγραμμα.

Προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών (MIKE 21 toolbox)

Στην παρούσα εργασία, μετά από δοκιμές και λαμβάνοντας υπόψιν συναφή παραδείγματα, επιλέγεται το Δυτικό όριο να έχει μηδενική ποσότητα κίνησης για όλα τα κελιά, ήτοι (0,0-0,549), ενώ για τα πλευρικά όρια, για το Βόρειο (0,549-209,549) κατασκευασμένο με βάση τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας και Νότιο (0,0-209,0) κατασκευασμένο με βάση την ποσότητα κίνησης) κατασκευάζονται αρχεία .dfs2 με χρήση της επιλογής Wave Generated Current and setup της καρτέλας Waves του MIKE 21 toolbox. Στο εργαλείο αυτό, εισάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας που έχει εξαχθεί από το κυματικό μοντέλο, ορίζονται τα κελιά που αποτελούν το αντίστοιχο όριο, η γωνία που σχηματίζει το δημιουργηθέν κυματογενές ρεύμα με το όριο, η αντίσταση του πυθμένα και το τυρβώδες ιξώδες. Ακόμη, καθορίζεται η περίοδος προσομοίωσης, η οποία πρέπει να είναι γενικά μεγαλύτερη ή ίση σε σχέση με την προσομοίωση του υδροδυναμικού μοντέλου, και συγκεκριμένα 5 hr (άθροισμα περιόδου προσομοίωσης και warm-up period) για την παρούσα εργασία. Το βήμα επιλέγεται 900 s και τα χρονικά βήματα 21, άρα $900 \cdot 21 = 18900 \text{ s} = 5,25 \text{ hr}$. Τέλος, ενεργοποιείται η επιλογή Soft Start, η οποία συνίσταται από το πρόγραμμα ώστε η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε βήμα να παίρνει ομαλά τη μέγιστη τιμή της και να μην δημιουργούνται αστάθειες.

Το τυρβώδες ιξώδες E_v εκφράζει την επιρροή της διατμητικής τάσης στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης λόγω τύρβης. Στην παρούσα εργασία, το τυρβώδες ιξώδες λαμβάνεται σταθερό για όλη την περιοχή μελέτης, και παίρνει την τιμή $E_v = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ σχετιζόμενο με την ταχύτητα λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο $E_v \leq 0,5(\Delta x^2/\Delta t) \leq 4,167$ (Σχέση 4.42) και μετά από έρευνα σε συναφή παραδείγματα. Επίσης, η αντίσταση του πυθμένα στη ροή C επιλέγεται σταθερή και εκφρασμένη με τον αριθμό Manning M, ο οποίος σε σχέση με τον αριθμό Chezy, είναι πιο ακριβής αν και αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο. Οι προτεινόμενες από το πρόγραμμα τιμές κυμαίνονται μεταξύ 20 - 40 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$, ενώ για την παρούσα εργασία επιλέγεται $M = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Έπειτα εισάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας από το κυματικό μοντέλο.

Αποτελέσματα (Results)

Τέλος, δημιουργείται ένα αρχείο αποτελεσμάτων, που περιλαμβάνει το ύψος του νερού H, καθώς και την ποσότητα κίνησης P, Q στις δύο διευθύνσεις x και y αντίστοιχα. Όσον αφορά τα αποτελέσματα, επιλέγεται να εξαχθεί με βάση τα προαναφερθέντα ένα τελικό αρχείο που

περιλαμβάνει την ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος V (m/s), το οποίο είναι και αυτό που παρουσιάζεται ως αρχείο αποτελεσμάτων. Επιλέγεται να παρουσιασθεί όλη η περιοχή μελέτης, όσον αφορά τη χωρική κλίμακα, ενώ ως προς το χρόνο επιλέγεται να παρουσιαστούν δέκα βήματα για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος. Το αρχείο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο στο μοντέλο στερεομεταφοράς ST.

4.3 Μοντέλο στερεομεταφοράς ST

Το MIKE 21 ST είναι ένα αριθμητικό μοντέλο του λογισμικού MIKE 21 που υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων (Non-cohesive sediment transport module) σε περιπτώσεις αμιγούς ρεύματος ή σε συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος. Επιπλέον, υπολογίζονται και οι αρχικοί ρυθμοί μεταβολής της στάθμης του πυθμένα. Το MIKE 21 ST δεν αποτελεί ένα πλήρες μορφολογικό μοντέλο, αλλά είναι δυνατόν με αυτό να προσδιορισθούν οι περιοχές πιθανής διάβρωσης ή απόθεσης ιζήματος. Υπάρχει δυνατότητα να ληφθούν υπόψιν στην προσομοίωση η παλίρροια, ο άνεμος, οι κυματισμοί και τα ρεύματα. Το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή σε φυσικά περιβάλλοντα, όπως εκβολές ποταμών και ακτογραμμές, καθώς επίσης και σε ανθρώπινες κατασκευές, όπως λιμάνια και γέφυρες.

4.3.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος

Στο μοντέλο MIKE 21 ST είναι διαθέσιμες πέντε διαφορετικές θεωρίες υπολογισμού της στερεομεταφοράς, σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος.

Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Hansen

Κατ' αρχάς, χρησιμοποιείται η θεωρία ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Engelund & Hansen. Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Phi_t = 0,1 \frac{C^2}{2g} \tau_\theta^{2,5} \quad (4.47)$$

$$\Phi_t = \frac{q_t}{(s-1)gD^3} \quad (4.48)$$

όπου C ο αριθμός Chezy, $s = \rho_s/\rho$ η σχετική πυκνότητα, D η διάμετρος κόκκου, q_t ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου και τ_θ η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα που προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gD} \quad (4.49)$$

όπου U_f η διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή.

Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Fredsøe

Επίσης, χρησιμοποιείται η θεωρία του ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Fredsøe. Ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου (q_t) υπολογίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πυθμένα (q_b) και του φορτίου σε αιώρηση (q_s), ήτοι $q_t = q_b + q_s$. Γίνεται η θεώρηση ότι η

στερεομεταφορά στον πυθμένα λαμβάνει χώρα σε ένα στρώμα πάχους ίσο με τη διάμετρο των κόκκων του ιζήματος και η στερεοπαροχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_b = 5p \left(\sqrt{\theta'} - 0,07\sqrt{\theta_c} \right) \sqrt{(s-1)gD} \quad , \quad \theta' > \theta_c \quad (4.50)$$

όπου p η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση, θ' η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) και θ_c η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης. Η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) θ' και η πιθανότητα p δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\theta' = \frac{U'_f{}^2}{(s-1)gD} \quad (4.51)$$

$$p = \left[1 + \left(\frac{\pi\beta_f / 6}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-0,25} \quad (4.52)$$

όπου U'_f η διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) και β_f ο δυναμικός συντελεστής τριβής. Το φορτίο σε αιώρηση υπολογίζεται ως:

$$q_s = 11,6U'_f{}^2 c_b a \left[I_1 \ln(30d / k_N) + I_2 \right] \quad (4.53)$$

όπου c_b η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος, $a = 2d$ το επίπεδο αναφοράς για το c_b , I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein, d το βάθος του νερού και $k_N = 2,5D$ η ισοδύναμη τραχύτητα του Nikuradse. Τα ολοκληρώματα I_1 και I_2 αποτελούν μια συνάρτηση του αδιάστατου επιπέδου αναφοράς $A = r/d$ και του αριθμού Rouse $z^* = W_f / \kappa U_{f,wc}$, με W_f να απεικονίζει την ταχύτητα καθίζησης του αιρούμενου ιζήματος, $\kappa = 0,4$ η σταθερά του Von Karman και $U_{f,wc}$ η διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος και έχουν όρια το διάστημα (a,d) , όπου το y μετράται πάνω από το σταθερό επίπεδο του πυθμένα. Στο επίπεδο αναφοράς $a = 2d$ η συγκέντρωση c_b , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_b = \frac{0,65}{(1+1/\lambda)^3} \quad (4.54)$$

όπου λ παράμετρος που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \pi p \beta / 6}{0,027s\theta'}} \quad , \quad \theta' > \theta_c + \pi p \beta / 6 \quad (4.55)$$

Λόγω του ότι η θεωρία των Engelund & Fredsøe αναπτύχθηκε βάσει αποτελεσμάτων που προέκυψαν από πειράματα με αμμώδες υλικό πυθμένα, η θεωρία ισχύει μόνο σε περιπτώσεις

στις οποίες το υλικό, που εισάγεται ως δεδομένο, έχει διάμετρο κόκκων παρόμοια με της άμμου.

Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Zyserman & Fredsøe

Η διατύπωση ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Zyserman & Fredsøe είναι μια μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς του συνολικού φορτίου q_t παρόμοια με αυτή των Engelund & Fredsøe, με μόνη διαφορά ότι η συγκέντρωση του φορτίου στον πυθμένα υπολογίζεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n}, \quad \theta' > \theta_c \quad (4.56)$$

όπου $A = 0,331$, $n = 1,75$, $c_m = 0,46$, $\theta_c = 0,045$ σταθερές.

Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα των Meyer-Peter & Müller

Κατά τη θεωρία αυτή, ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα υπολογίζεται ως:

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1,5} \quad (4.57)$$

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gD^3}} \quad (4.58)$$

Πρέπει να αναλογισθεί κανείς ότι σε περιπτώσεις όπου το ίζημα είναι πολύ λεπτόκοκκο και/ή η ταχύτητα του ρεύματος μεγάλη, με τη φόρμουλα αυτή υπολογίζονται μικρότεροι ρυθμοί στερεομεταφοράς από τους πραγματικούς, καθώς λαμβάνεται υπόψιν μόνο η συνεισφορά του φορτίου πυθμένα.

Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Ackers & White

Κατά τη θεωρία αυτή, ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi_b = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (4.59)$$

όπου C , A και m σταθερές που εξαρτώνται από το αδιάστατο μέγεθος D_{gr} το οποίο υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D_{gr} = D \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (4.60)$$

όπου D το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, s η σχετική πυκνότητα του ιζήματος και v το κινηματικό ιξώδες του νερού. Τέλος, η παράμετρος F_{gr} , που περιγράφει το γενικό αριθμό της κινηματικότητας του ιζήματος, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gD(s-1)}} \left[\frac{V}{\sqrt{32 \log(10d/D)}} \right]^{1-n} \quad (4.61)$$

όπου U_f η διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή, d το βάθος του νερού, V η μέση κατά βάθος ταχύτητα του ρεύματος, n μια σταθερά που εξαρτάται από το D_{gr} και κυμαίνεται στο διάστημα (0,1) από τα πιο χονδρόκοκκα προς τα πιο λεπτόκοκκα υλικά.

4.3.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου σε συνθήκες κύματος-ρεύματος

Στο μοντέλο MIKE 21 ST είναι διαθέσιμες δύο διαφορετικές μέθοδοι προσομοίωσης της στερεομεταφοράς, για συνδυασμό ρεύματος και κύματος.

Θεωρία μεταφοράς του Bijker

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το ολικό φορτίο μεταφοράς ιζημάτων q_t υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_t = q_b + q_s = q_b (1 + 1,83Q) \quad (4.62)$$

όπου q_b το φορτίο πυθμένα, q_s το αιωρούμενο φορτίο και Q αδιάστατος συντελεστής που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = \left[I_1 \ln \left(\frac{33d}{r} \right) + I_2 \right] \quad (4.63)$$

όπου d το βάθος του νερού, r είναι η τραχύτητα πυθμένα, I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein, που πρέπει να εκτιμηθούν αριθμητικά βάσει του αδιάστατου επιπέδου αναφοράς $A=r/d$ και z^* με το τελευταίο να δίνεται από τη σχέση:

$$z^* = \frac{W_f}{\kappa U_{f,wc}} \quad (4.64)$$

όπου W_f η ταχύτητα καθίζησης του αιωρούμενου ιζήματος, κ η σταθερά του Von Karman και $U_{f,wc}$ η διατμητική ταχύτητα κάτω από συνθήκες συνδυασμένης δράσης κύματος και ρεύματος. Η επίδραση των κυμάτων στη μεταφορά του αιωρούμενου φορτίου λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς μέσω της διατμητικής ταχύτητας $U_{f,wc}$. Η τραχύτητα r μπορεί να συσχετισθεί με τον αριθμό Chezy C , με την ακόλουθη σχέση:

$$C = 18 \log \left(\frac{12d}{r} \right) \quad (4.65)$$

Όσον αφορά το μέγεθος $U_{f,wc}$, αυτό υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \sqrt{1 + 0,5 \frac{\xi u_b}{V}} = \frac{V \sqrt{g}}{C} \sqrt{1 + 0,5 \left(\frac{\xi u_b}{V} \right)^2} \quad (4.66)$$

όπου $U_{f,c}$ είναι η ταχύτητα διάτμησης που σχετίζεται με το ρεύμα, V η ταχύτητα ρεύματος κατά μέσο όρο βάθος, u_b το εύρος της προκαλούμενης από κύμα ταχύτητας ταλαντώσεων στον πυθμένα και ξ ένας αδιάστατος συντελεστής που μπορεί να εκφραστεί σε όρους του

συντελεστή κυματικής τριβής f_w και του αριθμού C και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (4.67)$$

Ο παράγοντας κυματικής τριβής f_w υπολογίζεται από την εξής σχέση (Swart):

$$f_w = e^{-5,977+5,213(a_p/r)^{-0,194}}, \quad 1,47 < \frac{a_p}{r} < 3000 \quad (4.68\alpha)$$

$$f_w = 0,32, \quad \frac{a_p}{r} < 1,47 \quad (4.68\beta)$$

όπου a_p το πλάτος της κυματικής κίνησης που δίνεται από την εξής σχέση:

$$a_p = \frac{u_b T}{2\pi} \quad (4.69)$$

Το φορτίο πυθμένα q_b υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_b = BD_{50} U_{f,c} e^{\frac{0,27 \Delta D_{50} g}{\mu U_{f,c}^2}} \quad (4.70)$$

όπου B ένας αδιάστατος συντελεστής του φορτίου πυθμένα, Δ η σχετική πυκνότητα του ιζηματος που δίνεται από τη σχέση $\Delta = s-1$ και μ ο παράγοντας πτυχώσεων (Ripple factor). Αξίζει να αναφερθεί ότι η επίδραση των κυμάτων στο πυθμενικό φορτίο μεταφοράς q_b λαμβάνεται υπόψιν μέσω ενός όρου ανατάραξης, δηλαδή ο εκθέτης στην προαναφερθείσα εξίσωση. Ο όρος μεταφοράς σχετίζεται μόνο με το ρεύμα μέσω του $U_{f,c}$. Ο παράγοντας πτυχώσεων ορίζεται από την εξής σχέση:

$$\mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{1,5} \quad (4.71)$$

όπου C' είναι ο αριθμός Chezy που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυθμενικού υλικού και υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$C' = 18 \log \left(\frac{12d}{D_{90}} \right) \quad (4.72)$$

όπου D_{90} το μέγεθος των ιζημάτων για το οποίο το 90% (κατά βάρος) του πυθμενικού υλικού είναι λεπτότερο.

Ντετερμινιστικό μοντέλο μεταφοράς STP

Το ντετερμινιστικό διακυματικό πρόγραμμα μεταφοράς ιζημάτων STP της DHI χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τους ρυθμούς μεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων σε συνθήκες συνδυασμένης δράσης κύματος-ρεύματος. Το μοντέλο είναι ένα προηγμένο πρόγραμμα μεταφοράς που λαμβάνει υπόψιν μεταξύ άλλων την επίδραση στους υπολογιζόμενους ρυθμούς διεργασιών, όπως η κυματική διάδοση σε αυθαίρετη γωνία σε

σχέση με το κύμα, θραυόμενα ή μη θραυόμενα κύματα, επίπεδο θαλάσσιο πυθμένα ή πυθμένα με πτυχώσεις, ομοιόμορφο ή βαθμονομημένο ίζημα.

Προκειμένου να γίνει η παρούσα μέθοδος κατά το δυνατόν αποδοτική από υπολογιστική άποψη, το μοντέλο MIKE 21 ST παρεμβάλει τα ποσοστά μεταφοράς ιζημάτων από πίνακες μεταφοράς που δημιουργούνται εκ των προτέρων. Οι πίνακες αυτοί δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη (2DH) ή την εν μέρει τρισδιάστατη προσέγγιση (Q3D). Στην κλασσική, η ροή περιγράφεται κυρίως από τα κυματογενή ρεύματα, που σχηματίζουν γωνία με τη διεύθυνση των κυματισμών που κυμαίνεται μεταξύ 0° και 90°. Η προσέγγιση Q3D καλύπτει όλο το εύρος ενός πλήρους κύκλου και είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις που εξετάζουν την εκροή ποταμών ή που είναι έντονη η παρουσία παλίρροιας.

4.3.3 Εφαρμογή μοντέλου

Βασικές παράμετροι (Basic Parameters)

Σε πρώτη φάση, στην καρτέλα που αφορά τις βασικές παραμέτρους του προγράμματος (Basic Parameters), επιλέγεται αν το είδος της ανάλυσης θα είναι μελέτη αμιγούς ρεύματος ή συνδυασμός κύματος και ρεύματος. Στην παρούσα μελέτη ισχύει προφανώς η δεύτερη περίπτωση. Εν συνεχεία, εισάγεται ως δεδομένο το αρχείο που έχει προκύψει από το υδροδυναμικό μοντέλο και επιλέγεται αν η ανάλυση θα γίνει για όλη την περιοχή μελέτης ή για μια υποπεριοχή και επίσης αν θα γίνει για όλη τη χρονική περίοδο ή μέρος αυτής που χρησιμοποιήθηκε στο υδροδυναμικό μοντέλο. Στην εφαρμογή, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα με το HD δηλαδή χρονική περίοδος 4,5 hr με 10 χρονικά βήματα.

Παράμετροι μοντέλου (Model Parameters)

Στην καρτέλα που αφορά τις παραμέτρους του μοντέλου (Model Parameters), αρχικά επιλέγεται η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την κυκλοφορία των ιζημάτων. Η πρώτη επιλογή, μέθοδος Bijker, υπολογίζει απ' ευθείας τους ρυθμούς στερεομεταφοράς με τη μέθοδο του ολικού φορτίου, ενώ η δεύτερη είναι το ντετερμινιστικό μοντέλο STP, το οποίο κάνει παρεμβολή για τον υπολογισμό των ρυθμών κυκλοφορίας, βασισμένο σε πίνακα κατασκευασμένο από το χρήστη. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η δεύτερη δυνατότητα.

Προσδιορισμός πίνακα ιδιοτήτων ιζημάτων (MIKE 21 toolbox)

Σημειώνεται εδώ ότι χρησιμοποιείται δισδιάστατη προσομοίωση για το μοντέλο STP, επειδή γίνεται χρήση κυματογενών ρευμάτων που σχηματίζουν γωνία 90° με τα κύματα. Ο προαναφερθής πίνακας κατασκευάζεται με χρήση της επιλογής Generation of Sediment Tables της καρτέλας Sediments του MIKE 21 toolbox. Αρχικά, επιλέγονται γενικές παράμετροι που αφορούν τη μελέτη, οι οποίες είναι η σχετική πυκνότητα $s = \rho_s / \rho = 2,65$ (ρ_s , ρ η πυκνότητα του ιζήματος και του νερού αντίστοιχα) για άμμο, η θερμοκρασία του νερού $\theta = 16^\circ\text{C}$, η ακρίβεια των υπολογισμών όσον αφορά την ακρίβεια της τιμής των συγκεντρώσεων ιζημάτων (10^{-4}), ο μέγιστος αριθμός περιόδων κύματος (150) και η κρίσιμη τιμή της παραμέτρου Shields $\theta_c = 0,045$, η οποία είναι μια αδιάστατη έκφραση της διατμητικής τάσης στον πυθμένα που ορίζει την έναρξη κίνησης ενός κόκκου ιζήματος. Επίσης, επιλέγεται να μην ληφθούν υπόψιν στην εργασία πτυχώσεις που δημιουργούνται από

τα κύματα (wave generated ripples) και η κλίση του πυθμένα. Τέλος, επιλέγεται το ντετερμινιστικό μοντέλο (Engelund & Fredsøe, 1976) για την περιγραφή της συγκέντρωσης ιζήματος στον πυθμένα. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο πίνακας με τις παραμέτρους που αφορούν το είδος του ιζήματος, αλλά και το επικρατούν κυματικό καθεστώς. Σε τρεις στήλες, εισάγονται οι αρχικές τιμές, το βήμα και το πλήθος των τιμών αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πίνακα όσον αφορά την ταχύτητα του ρεύματος V , το ύψος κύματος H_{rms} , την περίοδο αιχμής T_p , το λόγο του ύψους κύματος προς το βάθος νερού H_{rms}/d , το μέγεθος κόκκου D_{50} , τη διαβάθμιση του εδαφικού υλικού σ_g και εφόσον έχει ληφθεί υπόψη, στοιχεία που αφορούν την κλίση του πυθμένα. Κάθε νέα τιμή j_n υπολογίζεται σε σχέση με την προηγούμενη j_{n-1} ως $j_n = j_{n-1} + \text{βήμα}$ εκτός της περίπτωσης του μεγέθους κόκκου για το οποίο ισχύει κατά αντιστοιχία $j_n = j_{n-1} * \text{βήμα}$. Γενική αρχή είναι ότι πρέπει τα μεγέθη του δημιουργηθέντος πίνακα να είναι σε κάθε βήμα υπολογισμού του μοντέλου στερεομεταφοράς (στην παρούσα εργασία είναι 10 τα χρονικά βήματα όπως αναφέρθηκε παραπάνω) μεγαλύτερα από τα δεδομένα της μελέτης. Αν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, το MIKE 21 ST δε λειτουργεί και ο πίνακας πρέπει να κατασκευασθεί εκ νέου με μεγαλύτερες τιμές ως προς την παράμετρο που υπάρχει πρόβλημα. Τέλος, όσον αφορά τη θραύση, επιλέγονται όπως και πρωτύτερα οι παράμετροι θραύσεως $\gamma_1 = 1$ και $\gamma_2 = 0,8$.

Στη συνέχεια εισάγονται τα κυματικά δεδομένα στο μοντέλο. Ορίζεται η περίοδος αιχμής, δηλώνεται ότι ο κানাβος έχει την ίδια διεύθυνση με αυτήν των προηγούμενων μοντέλων επιλέγοντας $I,k-coord=0$ στις αντίστοιχες και εισάγεται το αρχείο με τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου PMS που αφορούν το ύψος κύματος. Επιλέγεται να μην γίνει παρεμβολή μεταξύ των κυματικών δεδομένων αφού δεν εισάγονται ως χρονοσειρά αλλά να είναι σταθερά μεταξύ τους και επιλέγονται οι τιμές των παραμέτρων θραύσης.

Όσον αφορά την αντίσταση του πυθμένα, χρησιμοποιείται και εδώ σταθερός αριθμός Manning = 32, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα. Τέλος, εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν το είδος του ιζήματος, δηλαδή η μέση διάμετρος κόκκου $D_{50} = 1 \text{ mm}$, η διαβάθμιση $\sigma_g = 1,25$ και το πορώδες $n = 0,4$ τα οποία είναι σταθερά ως προς το χώρο και θεωρείται ότι δεν υπάρχει κάποια μη διαβρώσιμη επιφάνεια στον πυθμένα (βραχώδες υπόστρωμα).

Αποτελέσματα (Output)

Στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνεται ο ρυθμός στερεομεταφοράς P_s και Q_s κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα ($\text{m}^3/\text{έτος}/\text{m}$ πλάτους) και η μεταβολή του πυθμένα dz/dt (m/d).

5. Σχεδιασμός παράκτιας ζώνης και σεναρίων μελέτης

5.1 Πορεία διερεύνησης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γενικός στόχος είναι να διερευνηθεί η διάβρωση που δημιουργείται στην περιοχή της παράκτιας ζώνης πλησίον ενός λιμενικού έργου, ως αποτέλεσμα της ύπαρξης της κατασκευής στο πεδίο στερεομεταφοράς, και πώς αυτή μπορεί να αντιμετωπισθεί αποτελεσματικά με κάποια μέτρα προστασίας. Για τις ανάγκες της εργασίας, επιλέχθηκε να σχεδιασθεί ένα τυπικό λιμενικό έργο, όπως είναι μία μαρίνα σκαφών αναψυχής. Η στερεομεταφορά λαμβάνει χώρα με τους μηχανισμούς που έχουν ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Επισημαίνεται όμως, ότι για την παρούσα εργασία, αίτιο αποτελούν μόνο τα κυματογενή ρεύματα, καθώς δε λαμβάνονται υπόψιν άλλες αιτίες δημιουργίας ρευμάτων που μπορούν να θέσουν σε κίνηση και να μεταφέρουν τα ιζήματα, όπως ρεύματα ανεμογενή, παλιρροιακά ή πυκνότητας, καθώς κάτι τέτοιο θα περιέπλεκε πολύ τη διερεύνηση δεδομένου ότι το πρόβλημα είναι πολυπαραμετρικό. Σημειώνεται ότι, απουσία ισχυρής παλιρροιας, όπως συμβαίνει στον ελληνικό χώρο, τα κυματογενή ρεύματα και οι διαδικασίες που τα διέπουν, είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός που συμβάλει στη στερεομεταφορά.

Πρώτο μέλημα, κατά τη διαδικασία των υπολογισμών, είναι δεδομένου του κυματικού σεναρίου, να ευρεθεί το ύψος κύματος H_{rms} και οι τάσεις ακτινοβολίας S_{xx} , S_{xy} και S_{yy} για όλη την περιοχή. Δεύτερο βήμα της διαδικασίας αποτελεί η εύρεση της ταχύτητας V του δημιουργούμενου κυματογενούς ρεύματος για όλη την παράκτια περιοχή, δεδομένων των τάσεων ακτινοβολίας που έχουν υπολογισθεί νωρίτερα. Εν συνεχεία, υπολογίζεται ο ρυθμός στερεομεταφοράς ιζημάτων, για ίζημα δεδομένης κοκκομετρίας το οποίο στην παρούσα εργασία θεωρείται αμμώδες, με μέσο μέγεθος κόκκου $D_{50} = 1\text{mm}$, σχετικά καλής διαβάθμισης με $\sigma_g = \sqrt{D_{84}/D_{16}} = \sqrt{1,28/0,82} = 1,25$ (τιμές που έχουν υπολογισθεί από την κοκκομετρία του εδαφικού υλικού του πυθμένα) προσαρμοσμένο και αυτό στα ελληνικά δεδομένα. Ο ρυθμός στερεομεταφοράς υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τα ύψη κύματος και τις ταχύτητες του κυματογενούς ρεύματος που έχουν ευρεθεί στα προηγούμενα στάδια. Τελικό ζητούμενο είναι η εύρεση πιθανών περιοχών διάβρωσης στην περιοχή κοντά στη μαρίνα.

Εμβαθύνοντας το στόχο της παρούσας εργασίας, σημειώνεται ότι αυτός είναι διττός. Κατ' αρχάς, εξετάζονται πέντε τυπικές διατάξεις μαρινών, διαφορετικές κατά το δυνατόν μεταξύ τους, ώστε να καταδειχθεί με ακρίβεια το εύρος και η θέση της δημιουργούμενης διάβρωσης στην ακτογραμμή, με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες που την επηρεάζουν, δηλαδή βαθυμετρία, κυματικό καθεστώς και είδος ιζήματος. Πρώτος στόχος, λοιπόν, είναι ο εντοπισμός των τμημάτων που πλήττονται κατά κύριο λόγο από τη διάβρωση και το μέγεθος αυτής. Δεύτερος στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν κάποια από τα μέτρα προστασίας έναντι διάβρωσης που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, και τα οποία υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν υπόψιν στο υπολογιστικό μοντέλο MIKE 21 DHI και να διερευνηθεί πόσο μπορούν να επιδράσουν, ποιοτικά πάντα, περιορίζοντας το φαινόμενο.

Σημειώνεται εδώ, ότι τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου, αν και δίνουν ποσοτικά δεδομένα, καλό θα είναι να μην λαμβάνονται υπόψιν με σιγουριά από τον μελετητή, παρά μόνον από ποιοτικής απόψεως. Αυτό έγκειται στο ότι παραμονεύουν σοβαρές αποκλίσεις του υπολογιστικού μοντέλου από την πραγματικότητα των φαινομένων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία πραγματικών μελετών. Συνεπώς, το υπολογιστικό μοντέλο MIKE 21 DHI χρησιμοποιείται μεν για την προσομοίωση των φαινομένων της παράκτιας ζώνης και δύναται να δώσει ποσοτικά ενδεικτικά αποτελέσματα, αλλά για μία πραγματική μελέτη η διερεύνηση των φαινομένων και σε φυσική κλίμακα κρίνεται απαραίτητη για τον ασφαλή σχεδιασμό των έργων.

5.2 Κυματικά σενάρια μελέτης

Στην παρούσα εργασία, θωρούνται τυχαίοι σύνθετοι κυματισμοί με δεδομένα τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού ύψους κύματος H_{rms} , την περίοδο αιχμής T_p και τη μέση γωνία διεύθυνσης θ . Στην παρούσα εργασία επιλέγονται δύο κυματικά σενάρια τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Επισημαίνεται, ότι οι γωνίες είναι μετρημένες ως προς τον θετικό ημιάξονα x του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και ότι η πρώτη γωνία διεύθυνσης $\theta = 45^\circ$ θεωρείται η δυσμενέστερη περίπτωση ως προς την ένταση του δημιουργηθέντος κατά μήκος κυματογενούς ρεύματος. Επίσης, παρά το γεγονός ότι δεν αποτελούν πραγματικές μετρήσεις κάποιας παράκτιας περιοχής, τα δεδομένα είναι προσαρμοσμένα στον ελληνικό χώρο.

Πίνακας 5.1 Κυματικά σενάρια μελέτης

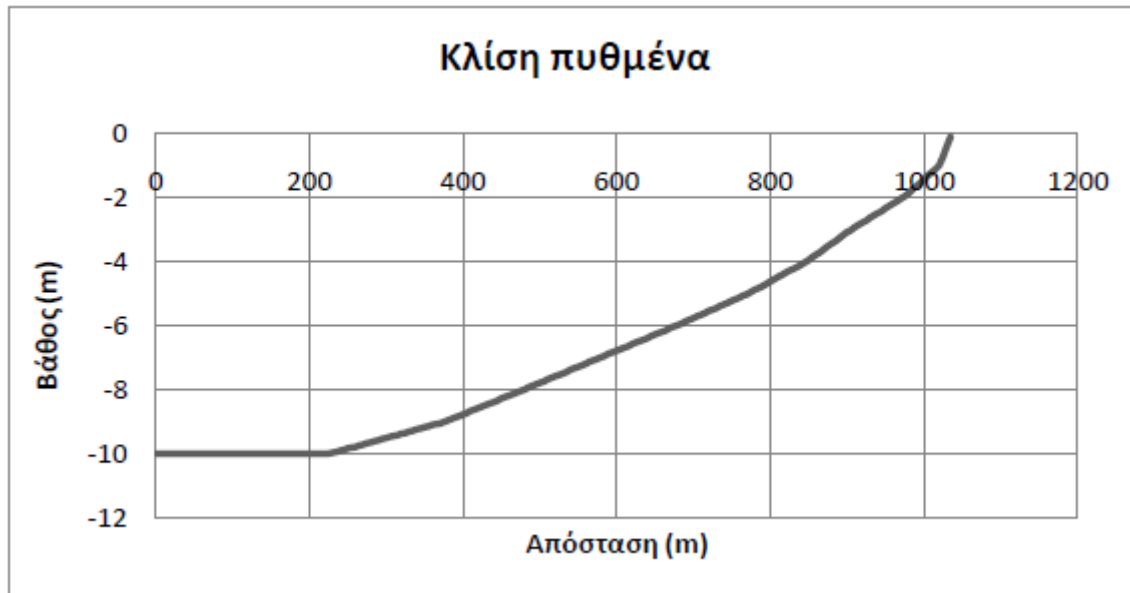
Κυματικό σενάριο	H_{rms} (m)	T_p (s)	θ (°)
Πρώτο	2	6	45
Δεύτερο	2,5	6,5	10

5.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας μελέτης

Η περιοχή μελέτης δεν αποτελεί κάποια πραγματική παράκτια ζώνη, αλλά είναι μία απλουστευμένη φανταστική περιοχή που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCad 2012. Στο παρόν εδάφιο περιγράφεται ο σχεδιασμός της βαθυμετρίας. Σημειώνεται, ότι για τα λογισμικά υδροδυναμικής ανάλυσης, ο καθορισμός της βαθυμετρίας αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για την επιτυχία του μοντέλου. Πρέπει να υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τα βάθη της παράκτιας περιοχής. Πέραν αυτού, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η εκλογή των κατάλληλων διαστάσεων της περιοχής μελέτης, οι οποίες πρέπει να είναι

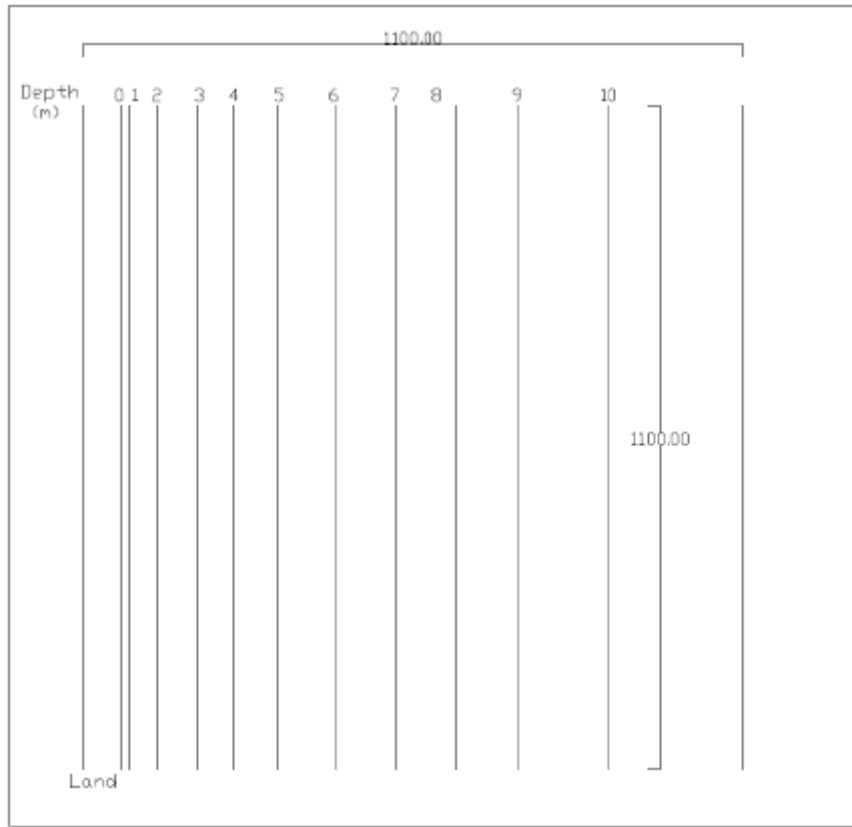
επαρκείς ώστε να μπορεί να καταστεί δυνατή η καταγραφή όλων των εξεταζόμενων φυσικών διεργασιών.

Στην εξεταζόμενη περιοχή, ο πυθμένας είναι επίπεδος, με κλίση περίπου 5% (Σχήμα 5.1), ενώ το μέγιστο βάθος φτάνει τα 10m.



Σχήμα 5.1 Διατομή πυθμένα περιοχής μελέτης

Οι ισοβαθείς είναι ευθύγραμμες και παράλληλες μεταξύ τους. Επίσης, η ακτή είναι ευθύγραμμη και παράλληλη προς τις ισοβαθείς. Αρχικά, σχεδιάζονται οι ισοβαθείς με χρήση του λογισμικού AutoCad 2012 ανά 1m βάθος (Σχήμα 5.2). Σημειώνεται ότι αφήνεται περιθώριο 50 m μεταξύ της αρχικής ευθείας του μοντέλου και της ισοβαθούς 0, μήκος το οποίο θεωρείται ίσο με το πλάτος της ακτογραμμής. Στη συνέχεια, και με χρήση εφαρμογής, εξάγονται οι συντεταγμένες (x,y) των σημείων που αποτελούν τις ισοβαθείς. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο πρόγραμμα Microsoft Excel, τα σημεία μετατρέπονται σε αρχεία (x,y,z) τριών διαστάσεων με τη μεταβλητή z να δηλώνει το βάθος τους. Πλέον, τα σημεία είναι έτοιμα να εισαχθούν στο λογισμικό προσομοίωσης MIKE 21. Αυτό γίνεται με την επιλογή Bathymetries του MIKE Zero, στην οποία, αφού καθορισθεί το μέγεθος της περιοχής μελέτης, εισάγονται τα αρχεία .xyz που έχουν κατασκευασθεί. Στην παρούσα εργασία, μετά από δοκιμές και σε συνάφεια με άλλες παρόμοιες εφαρμογές, επιλέγεται περιοχή μήκους 1100 m και ύψους 2750 m. Το πλάτος είναι το καθοριστικό μέγεθος, αφού ορίζεται σε σχέση με το σχεδιασμό των ισοβαθών. Στη συνέχεια, αποφασίστηκε το ύψος της περιοχής μελέτης να είναι 2,5 φορές μεγαλύτερο.



Σχήμα 5.2 Σχεδιασμός ισοβαθών στο Autocad

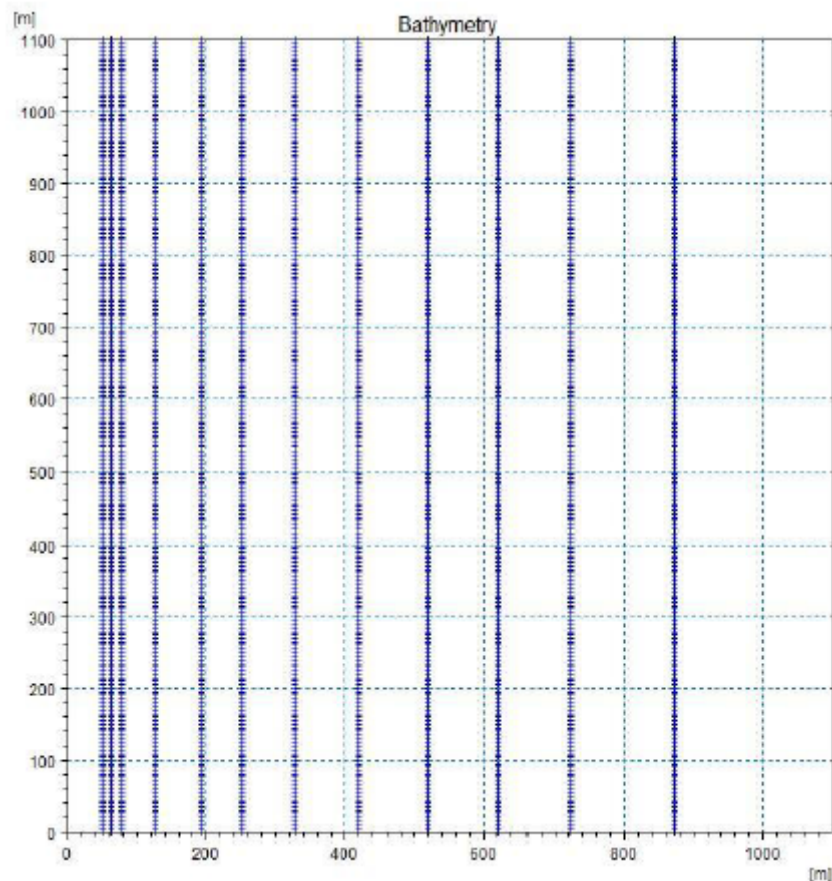
Εν συνεχεία, κατασκευάζεται ο κανάβος του μοντέλου, που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να είναι διάστασης 5m στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το μοντέλο απαιτεί οι αποστάσεις του κανάβου να παρέχουν επαρκή ανάλυση της βαθυμετρίας και του κυματικού πεδίου στο επίπεδο x-y. Για τη δεδομένη περιοχή των 1100mx2750m περιλαμβάνονται 220x550 κελιά. Το κυματικό μοντέλο PMS απαιτεί το μήκος κύματος L να περιλαμβάνει 5-7 κελιά, ήτοι $L \geq (5-7)\Delta x$. Στη ζώνη θραύσης μάλιστα, η απαίτηση αυτή είναι ακόμη πιο αυστηρή και επιβάλλει τα κελιά να είναι 8-10. Στην παρούσα εργασία, οι περίοδοι αιχμής για τα δύο κυματικά σενάρια είναι 6 και 6,5 s. Επί τω δυσμενέστερω, για περίοδο $T_p=6$ s, το μήκος κύματος L_0 στα βαθειά δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (5.1)$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει ότι $L_0 = 56,207$ m, ήτοι $L_0 / \Delta x = 56,207/5 = 11,24$, άρα η προαναφερθείσα απαίτηση καλύπτεται.

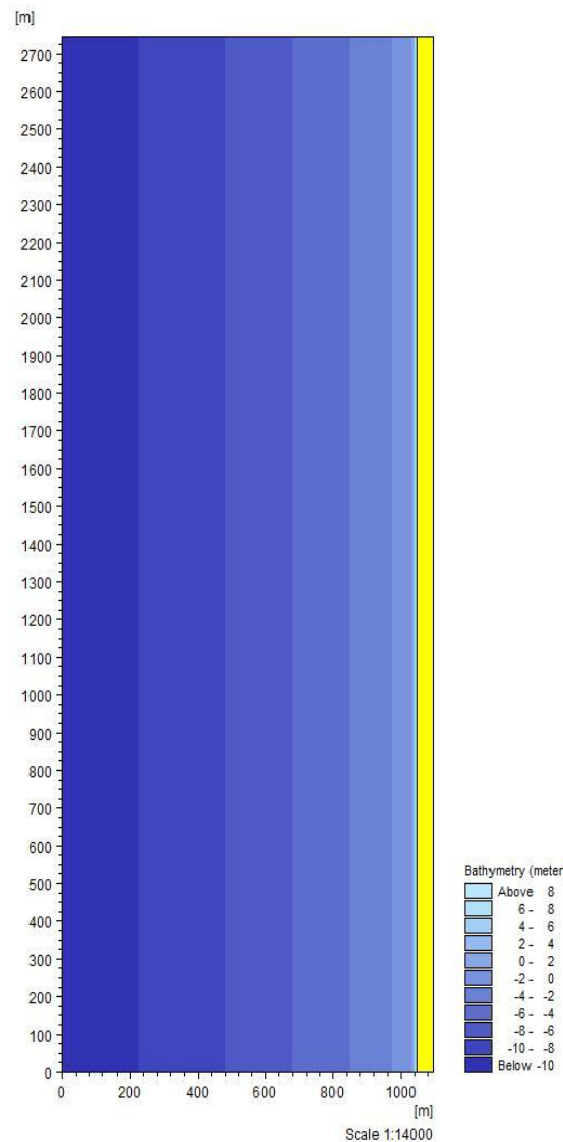
Το δημιουργηθέν αρχείο βαθυμετρίας .Batsf (Σχήμα 5.3) δημιουργεί τιμές βάθους για όλα τα κελιά. Αυτό γίνεται διαμέσου του προγράμματος με παρεμβολή των τιμών βάθους που έχουν ήδη εισαχθεί. Έχοντας ως δεδομένα τα βάθη των σημείων που φαίνονται στο Σχήμα 5.3 παρεμβάλλονται τιμές βάθους για όλα τα υπόλοιπα κελιά του μοντέλου. Σημειώνεται εδώ, ότι στα Σχήματα 5.2 και 5.3 δεν παρουσιάζεται ολόκληρη η περιοχή. Από το προαναφερθέν

αρχείο, εξάγεται ένα αρχείο αποτελεσμάτων .dfs2 (Σχήμα 5.4). Σημειώνεται εδώ, ότι η βαθυμετρία πρέπει να εισαχθεί στο πρόγραμμα στραμμένη κατά 180° για να συνάδει με τις επιταγές του λογισμικού. Τούτο, γίνεται με χρήση της επιλογής Rotate Grid της καρτέλας Transformation του MIKE Zero toolbox με την οποία δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να στρέψει την περιοχή μελέτης. Η τελική βαθυμετρία που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας στο MIKE

Στο Σχήμα 5.4 φαίνονται οι ισοβαθείς σχεδιασμένες ανά δύο μέτρα, ενώ με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η στεριά. Σημειώνεται επίσης, ότι η κλίμακα που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων είναι 1:14000.



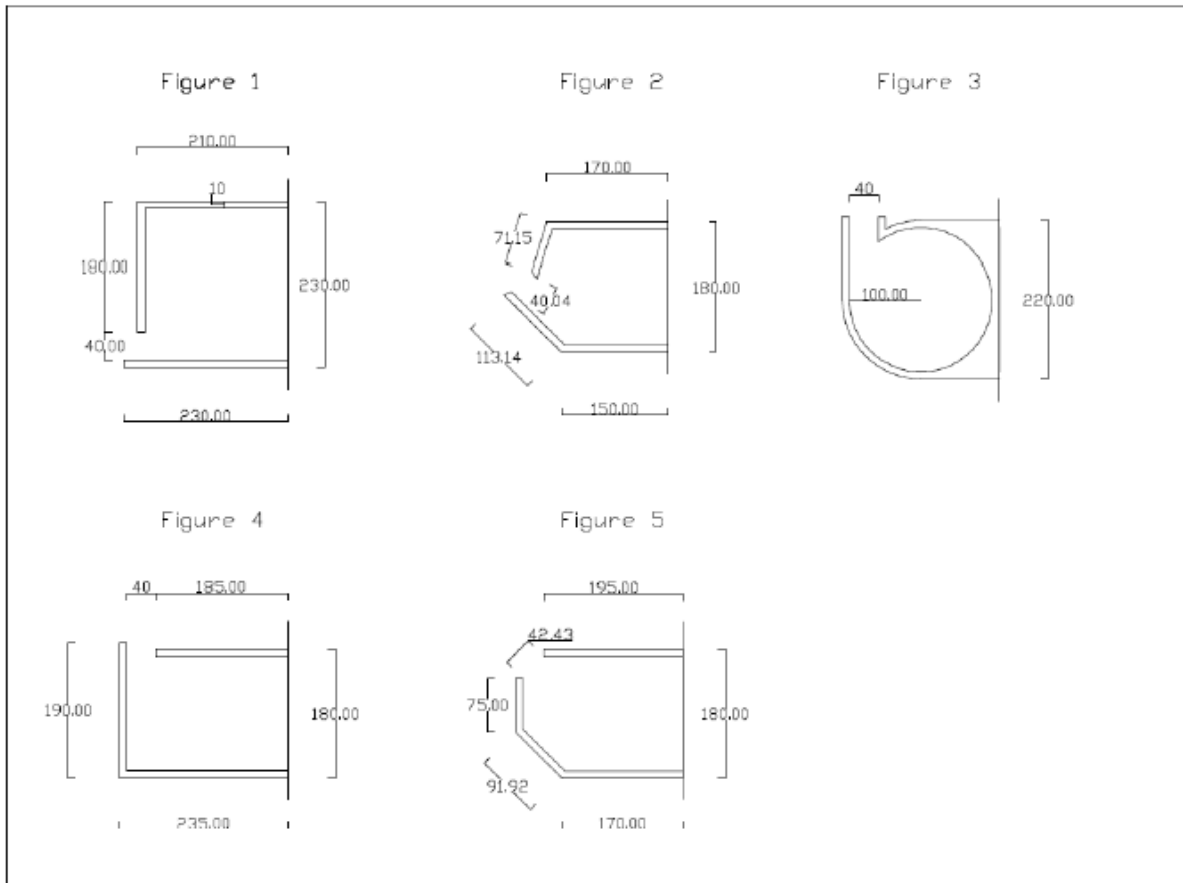
Σχήμα 5.4 Τελική βαθυμετρία περιοχής μελέτης (Κλίμακα 1:14000)

5.4 Διατάξεις μαρινών

Οι πέντε διατάξεις μαρινών έχουν σχεδιαστεί με βάση διερεύνηση της κατασκευής ελληνικών μαρινών με αντίστοιχη ικανότητα ελλιμενισμού, επιφάνεια και πλάτος ανοίγματος εισόδου. Έγινε προσπάθεια να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το σχεδιασμό, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση αυτού στη στερεομεταφορά. Οι πέντε διατάξεις (Σχήμα 5.5) σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν ίδιο πλάτος ανοίγματος εισόδου 40m, περίπου ίδια επιφάνεια και ικανότητα ελλιμενισμού.

Όσον αφορά τη διάταξη των μαρινών σε σχέση με τα κυματικά σενάρια, παρατηρείται ότι η διάταξη 1 δεν είναι προστατευμένη ως προς τους επικρατούντες κυματισμούς. Αυτό έχει γίνει για να εξεταστεί κατά το δυνατό η δυσμενέστερη περίπτωση. Σε πραγματικές συνθήκες σε θαλάσσια ακτή δεν ενδείκνυται η χρήση μίας τέτοιας διάταξης, παρά μόνον εάν η μαρίνα βρίσκεται μέσα σε ποταμό, καθώς σε μία τέτοια περίπτωση οι κυματισμοί έχουν σταθερή

κατεύθυνση συνεχώς. Αντίθετα, υπάρχει προστασία εν μέρει για τις διατάξεις 2 και 5, ενώ η 3 και 4 είναι καλά προστατευμένες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η τρίτη διάταξη είναι μια διάταξη με μη συμβατικό σχεδιασμό για να καταδειχτεί κατά πόσο μια ομαλή-καμπύλη επιφάνεια πρόσκρουσης με το κυματογενές ρεύμα μπορεί να έχει ευεργετικό χαρακτήρα.

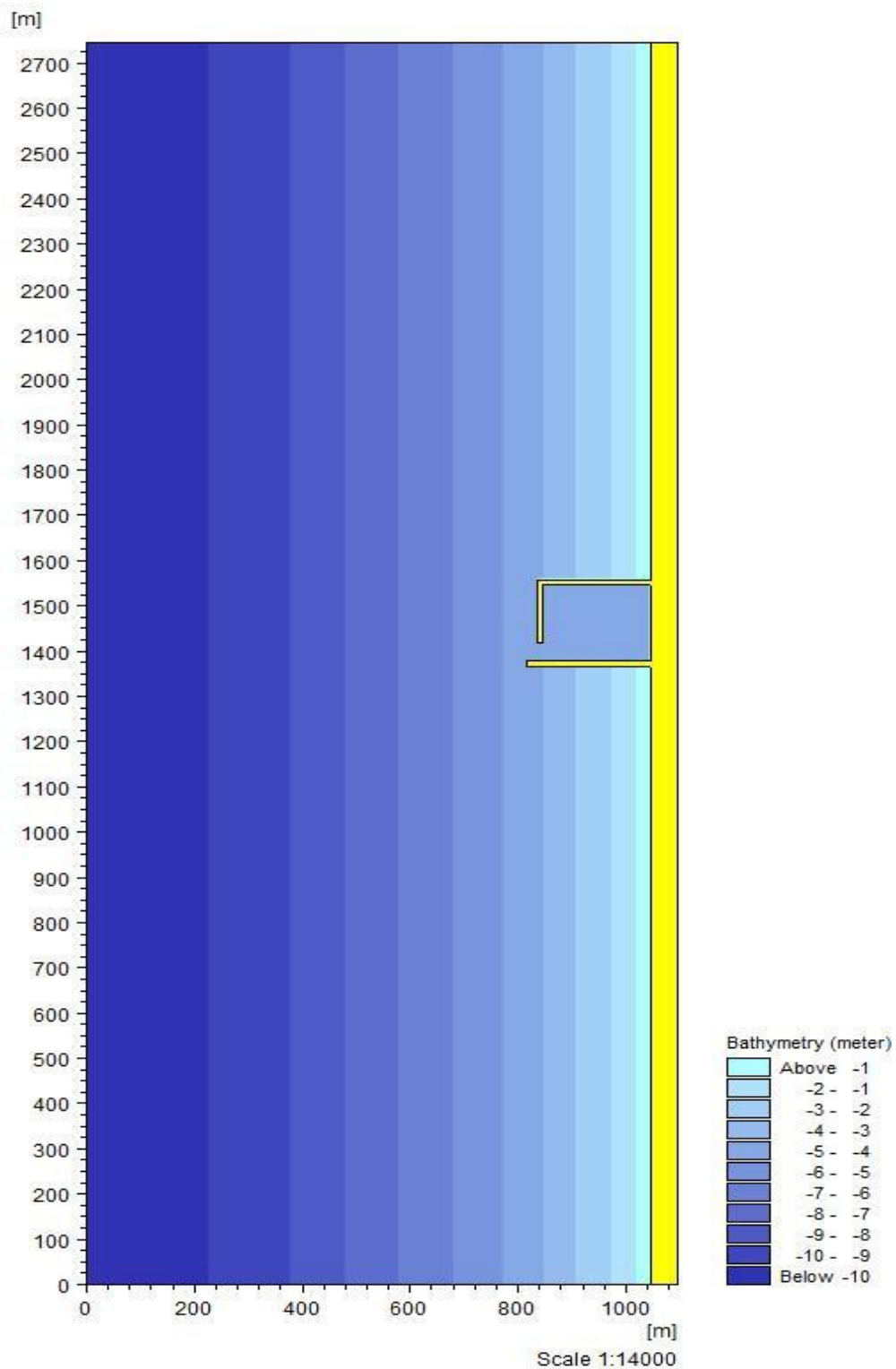


Σχήμα 5.5 Σχεδιασμός διατάξεων μαρινών στο Autocad

Αξίζει να τονιστεί ότι, όσον αφορά το πρόγραμμα, οι μαρίνες εισάγονται ως στεριά και θεωρείται ότι έχουν την ίδια λειτουργία με αυτή. Σημειώνεται λοιπόν, ότι δε λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς το υλικό κατασκευής της μαρίνας και η λειτουργία του με κάποιον τρόπο. Τούτο γίνεται μεταβάλλοντας τα βάθη που έχουν υπολογισθεί από το πρόγραμμα και δίνοντας τους τιμή βάθους +10 m, το οποίο θεωρείται στεριά.

Οι διατάξεις σχεδιάζονται κατά το δυνατό στο μέσο της περιοχής. Τούτο έγινε μετά από δοκιμές και διαφορετικές πιθανές θέσεις κατασκευής της μαρίνας καθ' ύψος αυτής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχεδιασμός της παράκτιας περιοχής, η επιλογή του κανάβου αλλά ακόμη και η σωστή τοποθέτηση του λιμενικού έργου στο μοντέλο είναι μείζονος σημασίας για την επιτυχία της προσομοίωσης.

Στο ακόλουθο Σχήμα 5.6, φαίνεται πώς τοποθετείται η διάταξη 1 στην εξεταζόμενη περιοχή μελέτης. Η διάταξη τοποθετείται σε ύψος περίπου 1300 m και φτάνει περί τα 1600 m, στοιχείο που είναι κοινό για όλες τις διατάξεις.



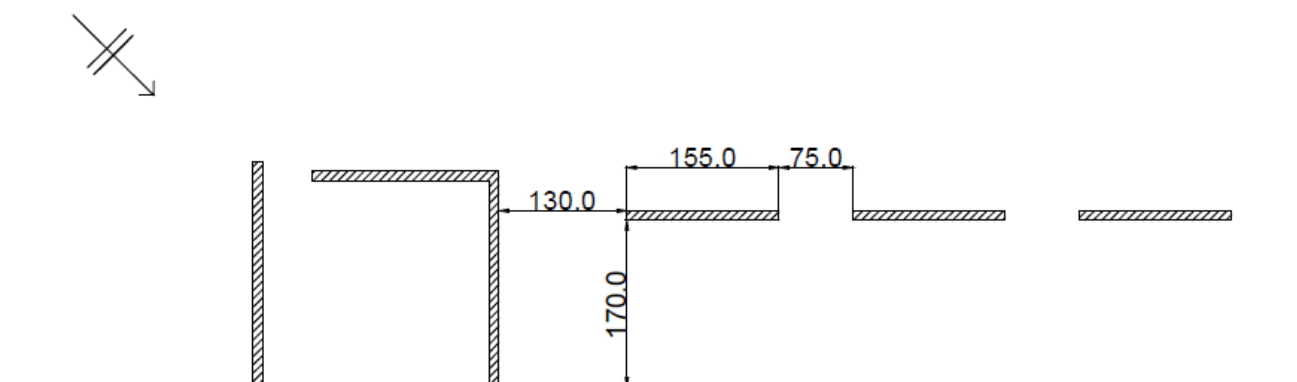
Σχήμα 5.6 Σχεδιασμός διάταξης 1 σε περιβάλλον MIKE

5.5 Διατάξεις για την αντιμετώπιση της διάβρωσης

Στο εδάφιο αυτό, παρουσιάζονται οι διατάξεις κατασκευών που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση της διαβρώσεως. Δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι διατάξεων έξαλλων κυματοθραυστών, κυρίως γιατί είναι εύκολος ο σχεδιασμός τους στο μοντέλο σε σχέση με ύψαλες κατασκευές ή χαμηλής στέψης. Στόχος είναι να ερευνηθεί η αποτελεσματικότερη διάταξη κυματοθραυστών για την καλύτερη αντιμετώπιση της διάβρωσης. Σημειώνεται, ότι όλες οι δοκιμές κυματοθραυστών έγιναν με τη διάταξη μαρίνας 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο, λόγω του ότι τα αποτελέσματα διάβρωσης για τη συγκεκριμένη περίπτωση κρίθηκαν δυσμενέστερα. Συγκεκριμένα, αρχικά δοκιμάστηκε σύστημα τριών παράλληλων κυματοθραυστών (Δοκιμή 1) και σύστημα δύο παράλληλων κυματοθραυστών (Δοκιμή 2). Και στις δύο δοκιμές τα έργα είχαν ίδιες διαστάσεις. Στη συνέχεια, και δεδομένου ότι οι τρεις κυματοθραύστες δεν προσέδωσαν σημαντικότερη προστασία στην ακτή, δοκιμάστηκε σύστημα δύο παράλληλων κυματοθραυστών με αλλαγή των διαστάσεων και αποστάσεων τους (Δοκιμή 3 και 4). Τέλος, για τη βελτιστοποίηση του συστήματος δοκιμάστηκαν κυματοθραύστες με αλλαγή κλίσης στο άκρο τους (Δοκιμή 5).

5.5.1 Δοκιμή 1 με τρεις κυματοθραύστες

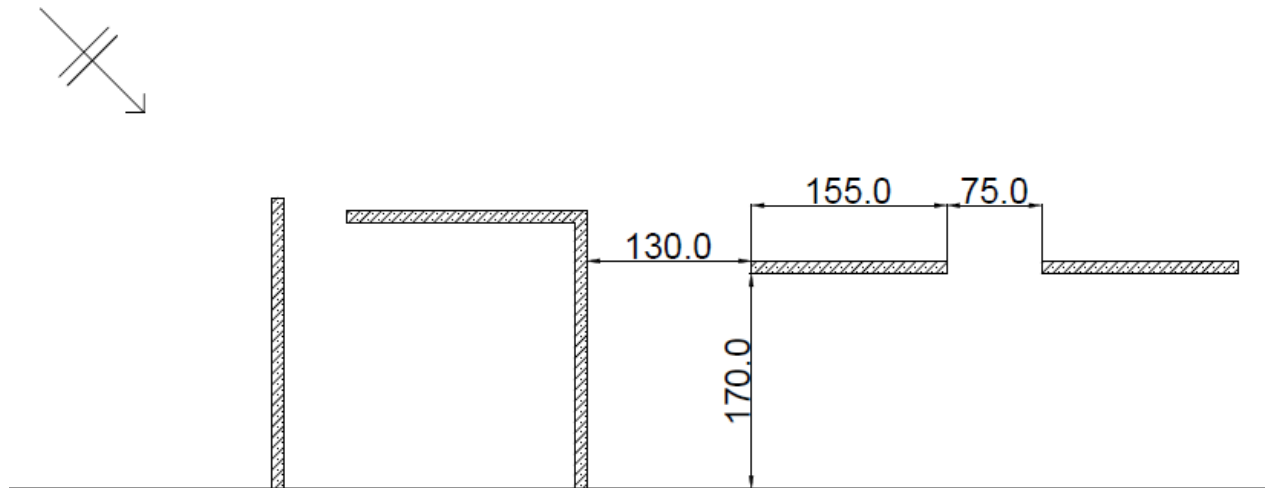
Αρχικά, δοκιμάστηκε σύστημα τριών παράλληλων κυματοθραυστών. Οι κυματοθραύστες είχαν όλοι διαστάσεις 155m x 10m και τοποθετήθηκαν σε απόσταση 75m μεταξύ τους (Σχήμα 5.7). Οι κυματοθραύστες θεωρούνται από το λογισμικό ως στεριά, όπως δηλαδή και οι μαρίνες και το ύψος τους θεωρείται τέτοιο ώστε να υπερβαίνει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η χωροθέτηση τους έγινε με βάση την υπό διάβρωση περιοχή και σε σχέση με τη ζώνη θραύσεως, η οποία υπολογίστηκε σε βάθος περίπου 3,5 m. Συνεπώς, οι κυματοθραύστες τοποθετήθηκαν στη ζώνη αμέσως πριν από τη θραύση και σε απόσταση 170 m από την ακτή. Η απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών στο σύστημα επιλέχθηκε ίση με 75 m ακολουθώντας τις σχέσεις του εδαφίου 3.2.2 για σχηματισμό salient. Συγκεκριμένα, πρέπει $L_s/Y=0,67$, δηλαδή $L_s = 0,67 \times 170 = 113,9$ m τουλάχιστον. Επιλέχθηκε $L_s = 155$ m.



Σχήμα 5.7 Δοκιμή 1 με τρεις κυματοθραύστες σε Autocad

5.5.2 Δοκιμή 2 με δύο κυματοθραύστες

Στη δεύτερη δοκιμή ο τρίτος κυματοθραύστης αφαιρέθηκε, ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή του στο αποτέλεσμα της στερεομεταφοράς. Ο λόγος είναι κυρίως οικονομικός, διότι αν η κατασκευή ενός ακόμη κυματοθραύστη δεν αποδίδει σημαντικά στο στόχο της προστασίας, τότε η λύση κρίνεται ασύμφορη και προτιμάται η επιλογή συστήματος δύο κυματοθραυστών για να καλύπτουν τον ίδιο χώρο διάβρωσης (Σχήμα 5.8).

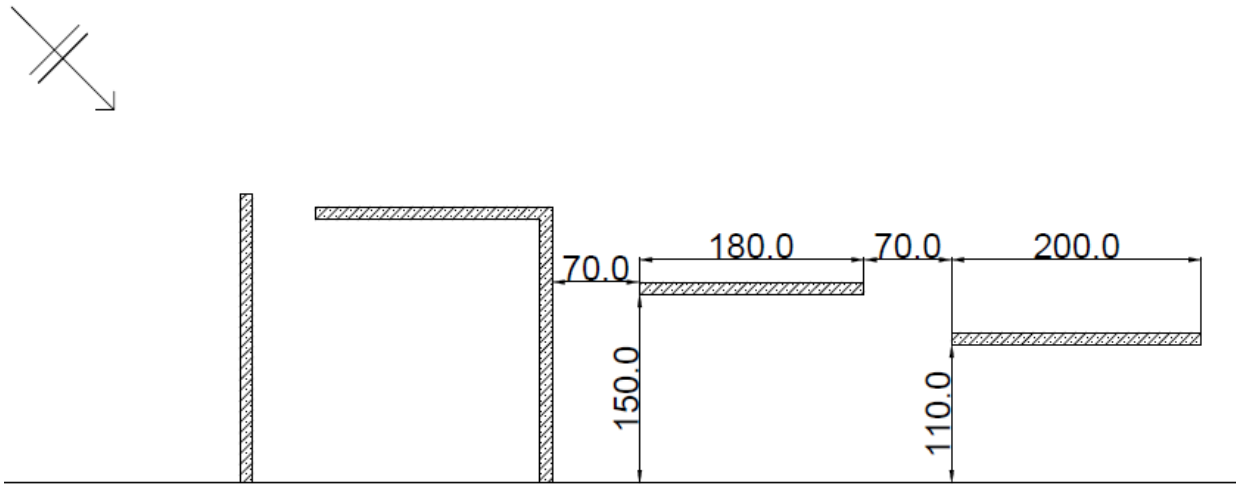


Σχήμα 5.8 Δοκιμή 2 με δύο κυματοθραύστες σε Autocad

5.5.3 Δοκιμή 3 με αλλαγή διαστάσεων και αποστάσεων

Εφόσον από τα αποτελέσματα δεν αποδείχθηκε η ανάγκη κατασκευής τρίτου κυματοθραύστη, η διερεύνηση συνεχίστηκε για το σύστημα των δύο κυματοθραυστών δοκιμάζοντας διαφορετικές διαστάσεις και αποστάσεις αυτή τη φορά. Επιλέχθηκε οι δύο κυματοθραύστες να έχουν διαφορετικό μήκος έκαστος (διαστάσεις 180m x 10m και 200m x 10m αντίστοιχα). Η δεύτερη ιδιαιτερότητα έχει να κάνει με την απόστασή τους από την ακτή, καθώς όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα επιλέχθηκε ο ένας κυματοθραύστης από τους δύο να τοποθετηθεί πιο κοντά στην ακτή. Το σκεπτικό της συγκεκριμένης επιλογής έχει να κάνει με την αποτελεσματικότερη εξουδετέρωση της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας.

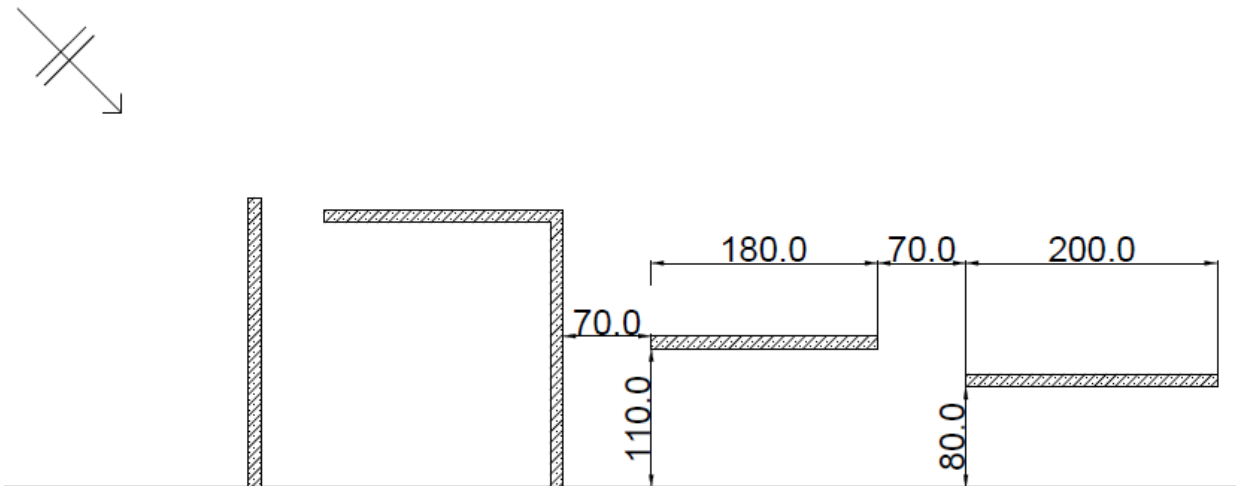
Η Δοκιμή 3 φαίνεται στο Σχήμα 5.9 στο οποίο φαίνονται και οι αποστάσεις κάθε κυματοθραύστη από την ακτή.



Σχήμα 5.9 Δοκιμή 3 σε Autocad

5.5.4 Δοκιμή 4 με αλλαγή διαστάσεων και αποστάσεων

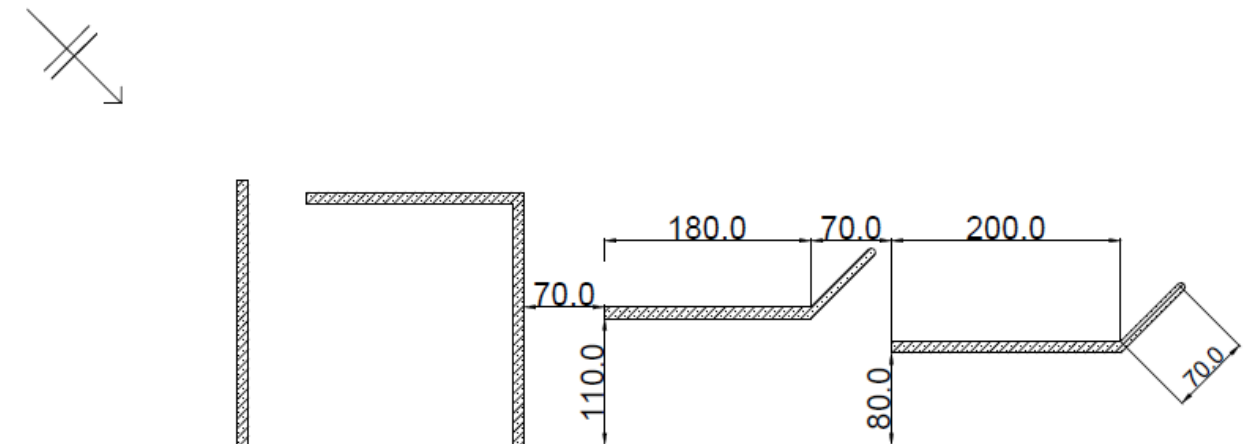
Στη Δοκιμή 4 επιλέχθηκε το ίδιο σύστημα κυματοθραυστών με τη Δοκιμή 3 με μόνη διαφορά την απόσταση των έργων από την ακτή. Στο Σχήμα 5.10 φαίνονται οι αποστάσεις κάθε κυματοθραύστη από την ακτή.



Σχήμα 5.10 Δοκιμή 4 σε Autocad

5.5.4 Δοκιμή 5 με αλλαγή κλίσης

Σε αυτή τη δοκιμή επιλέχθηκε να κατασκευασθεί ένα τμήμα μήκους 70 m με κλίση 45° ως προς τη διεύθυνση του κυματοθραύστη, για την εξομάλυνση των έντονων κυματικών φαινομένων που δημιουργούνται στο άκρο του κυματοθραύστη από την απότομη αλλαγή της ταχύτητας ροής (Σχήμα 5.11). Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι η γωνία των 45° επιλέχθηκε διότι ήταν εύκολος ο σχεδιασμός της στο πρόγραμμα, χωρίς να επηρεαστεί ιδιαίτερα η βαθυμετρία της περιοχής και για να αποφευχθούν σφάλματα κλίμακας. Κάλιστα, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μικρότερη γωνία που θα μας έδινε ίσως καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.11 Δοκιμή 5 με αλλαγή κλίσης στο άκρο του κυματοθραύστη

6. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

6.1 Διερεύνηση διάβρωσης στην περιοχή μελέτης

Σε πρώτο στάδιο χρησιμοποιήθηκαν οι πέντε τυπικές διατάξεις μαρινών σε δύο κυματικά σενάρια που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ώστε να εντοπισθεί στην περιοχή μελέτης το μέγεθος και η θέση της διάβρωσης, ανάλογα και με τη μορφή που μπορεί να πάρει το έργο της μαρίνας. Μετά την εφαρμογή του μοντέλου διαπιστώθηκε ότι τα δυσμενέστερα αποτελέσματα ως προς την δημιουργηθείσα διάβρωση εντοπίζονται στη μορφή της διάταξης 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Στο Παράρτημα παρατίθενται γραφικώς τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις αναλυτικά. Στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του ρυθμού διάβρωσης του πυθμένα για κάθε διάταξη που δοκιμάστηκε και σε κάθε κυματικό σενάριο. Είναι φανερό ότι η διάταξη 1 για το πρώτο κυματικό σενάριο (45°) παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέγεθος διάβρωσης. Επίσης, το δεύτερο κυματικό σενάριο δίνει σαφώς μικρότερης έντασης διάβρωση, πράγμα αναμενόμενο λόγω της μικρότερης γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών (10°).

Πίνακας 6.1 Μέσες τιμές ρυθμού διάβρωσης πυθμένα για κάθε διάταξη και σενάριο μελέτης

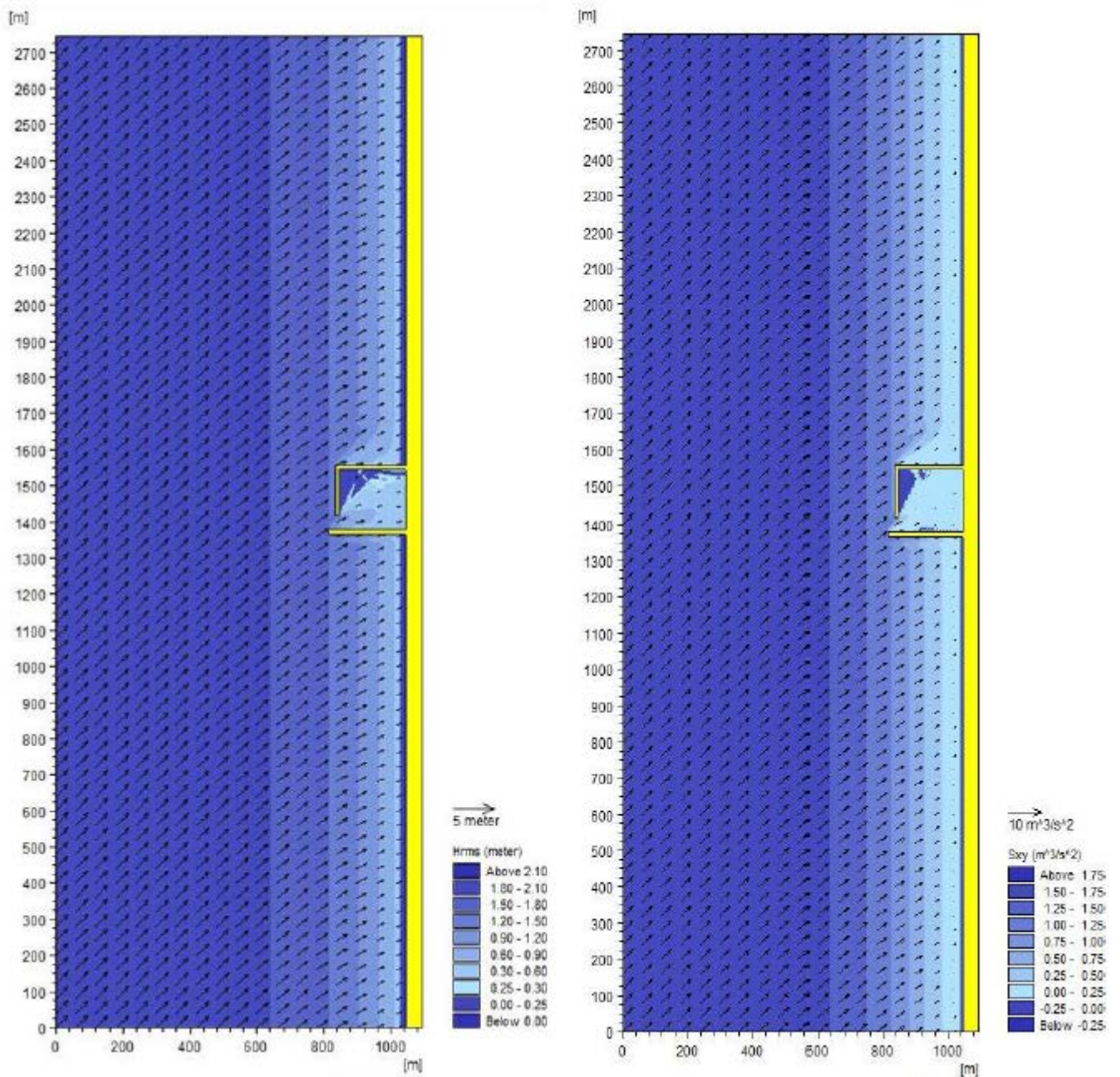
	Κυματικό σενάριο	
	Πρώτο	Δεύτερο
Διάταξη 1	-4,2 mm/day	-0,6 mm/day
Διάταξη 2	-4,1 mm/day	-0,6 mm/day
Διάταξη 3	-2,6 mm/day	-0,4 mm/day
Διάταξη 4	-2,8 mm/day	-0,7 mm/day
Διάταξη 5	-3,9 mm/day	-0,6 mm/day

Κατ' αρχάς, όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, χρησιμοποιείται το κυματικό μοντέλο PMS για τον προσδιορισμό του ύψους κύματος και των τάσεων ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, το ύψος κύματος μειώνεται ομαλά από τα 2 m, τιμή που επικρατεί στα βαθειά μέχρι να μηδενιστεί στην ακτογραμμή. Η περίοδος αιχμής προφανώς παραμένει σταθερή, ενώ η μέση γωνία διεύθυνσεως μειώνεται από την αρχική τιμή των 45° συνεχώς μέχρι να φτάσει τις 0° (κάθετη πρόσκρουση στην ακτογραμμή), λόγω διάθλασης. Οι τάσεις ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1 έχουν παρόμοια απεικόνιση και τάση με το ύψος κύματος.

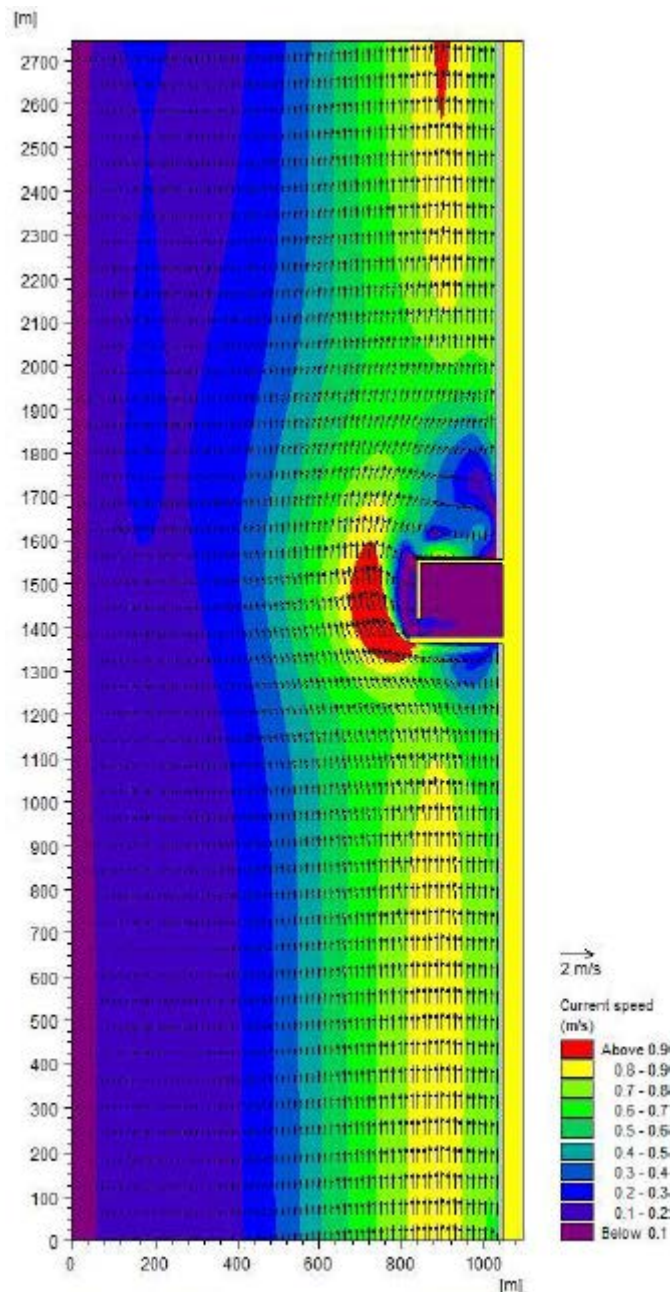
Με δεδομένο το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας και με χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου MIKE 21 HD, προσδιορίζεται η ταχύτητα V του κυματογενούς ρεύματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2. Η ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος φτάνει, όπως είναι

αναμενόμενο, τη μέγιστη τιμή της κοντά στη μαρίνα όπου ξεπερνά τοπικά τα 0,9 m/s. Συγκεκριμένα, στον προσήνεμο μάλω, όπου το ρεύμα προσκρούει στη μαρίνα, παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες. Επίσης, φαίνεται ότι κυριαρχεί η κατά μήκος της ακτογραμμής συνιστώσα του κυματογενούς ρεύματος.

Με δεδομένα τα αρχεία του ύψους κύματος (Σχήμα 6.1) και της ταχύτητας ρεύματος (Σχήμα 6.2) προσδιορίζεται ο ρυθμός στερεομεταφοράς και ο αρχικός ρυθμός μεταβολής του ύψους του πυθμένα με το μοντέλο MIKE 21 ST. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.3. Όπως ήταν αναμενόμενο, σε περιοχές με μεγάλες ταχύτητες ρεύματος, μεταφέρεται περισσότερη ποσότητα ιζήματος και παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός στερεομεταφοράς. Πρέπει να τονιστεί για ακόμη μία φορά ότι το MIKE 21 ST δεν αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μορφολογικό μοντέλο αλλά δύναται να καταδείξει πιθανές περιπτώσεις αποθέσεως και διάβρωσης, συνεπώς τα αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπίζονται με κάποια επιφύλαξη.

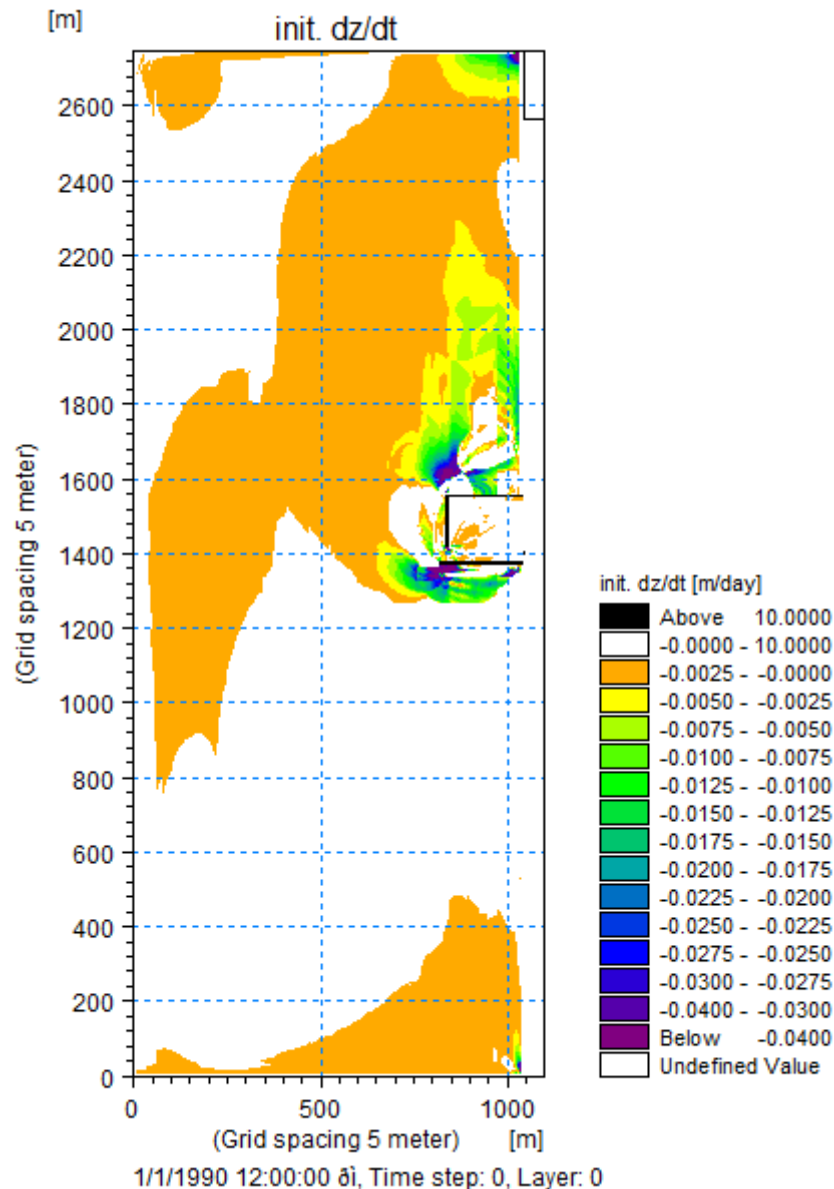


Σχήμα 6.1 Ύψος κύματος H_{rms} (m) (αριστερά) και τάσεις ακτινοβολίας S_{xy} (m^3/s^2) (δεξιά) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα 6.2 Ταχύτητα ρεύματος V (m/s) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3 η περιοχή που πλήττεται από διάβρωση εκτείνεται σε ένα μήκος περίπου 300 m, ξεκινώντας στα κατάντη της μαρίνας και σε απόσταση περί τα 180 m από τον υπήνεμο μόλο του έργου. Σε αυτή την περιοχή, ο ρυθμός διάβρωσης του πυθμένα παίρνει μία μέση τιμή στα $-4,2$ mm/day με μέγιστη τιμή τοπικά τα $-23,3$ mm/day.



Σχήμα 6.3 Ρυθμός διάβρωσης – μεταβολής πυθμένα για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο

Έντονο πρόβλημα διάβρωσης εντοπίζεται (στο Σχήμα 6.3 σημειώνεται με έντονο μωβ) πέρα από την κατάντη ακτογραμμή και στην περιοχή εισόδου της μαρίνας αλλά και αμέσως μετά τον υπήνεμο μώλο, πράγμα αναμενόμενο λόγω της απότομης αλλαγής των συνθηκών ροής σε αυτά τα σημεία. Εκεί εντοπίζεται και η μέγιστη τιμή ρυθμού διάβρωσης σε όλη την περιοχή μελέτης που είναι $-63,1 \text{ mm/day}$.

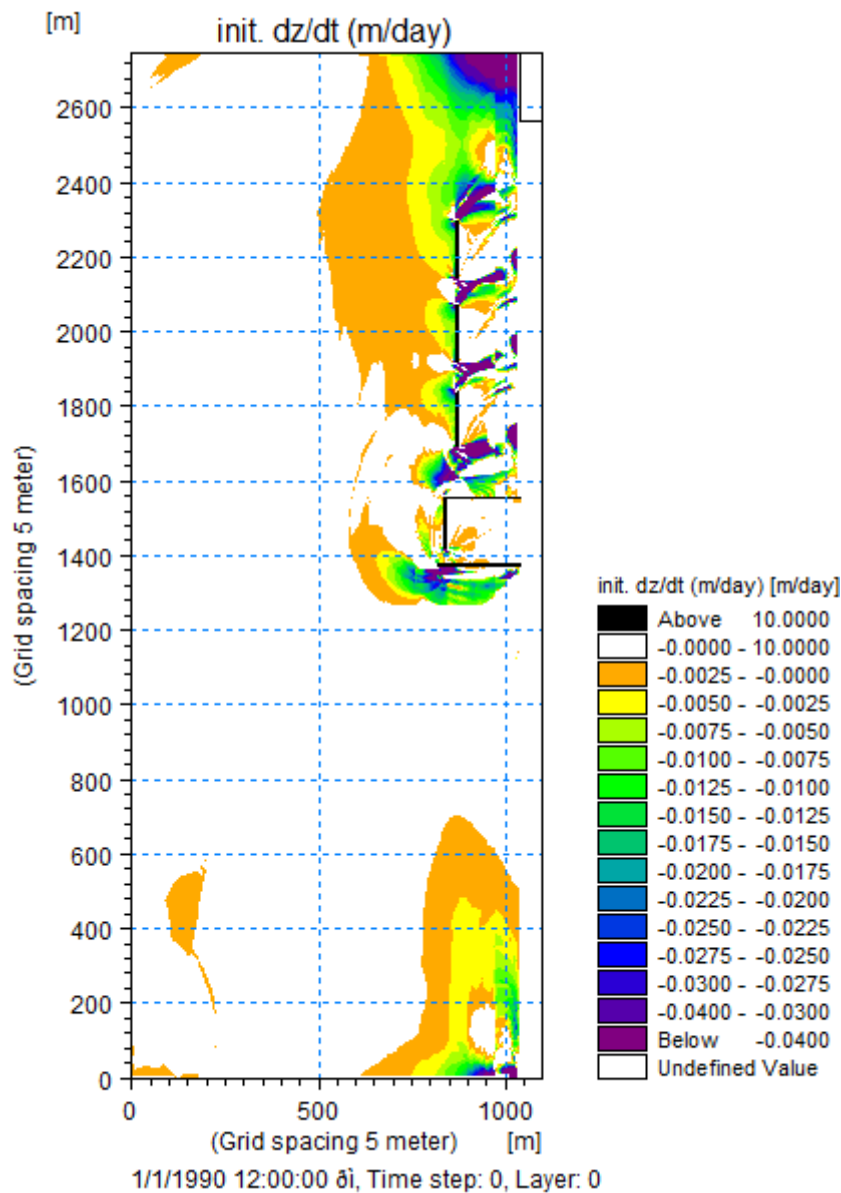
Όλες οι δοκιμές για την αντιμετώπιση της διάβρωσης που ακολουθούν έγιναν πάνω στη διάταξη μαρίνας 1 με το πρώτο κυματικό σενάριο, διότι όπως προαναφέρθηκε η συγκεκριμένη περίπτωση παρουσίασε το μεγαλύτερο πρόβλημα διάβρωσης.

Σημειώνεται εδώ, προς αποφυγή παρανοήσεως, ότι η διάβρωση που βγάζει το πρόγραμμα στις γωνίες της περιοχής μελέτης και ιδιαίτερα πάνω δεξιά στο σχήμα δεν οφείλεται σε

ρεαλιστικά στοιχεία αλλά είναι αποτέλεσμα των οριακών συνθηκών του μοντέλου, συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψιν για τη συγκεκριμένη εργασία.

6.2 Αποτελέσματα Δοκιμής 1

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται γραφικώς το αποτέλεσμα στην περιοχή μελέτης μετά την εφαρμογή συστήματος τριών παράλληλων όμοιων κυματοθραυστών. Η διάβρωση μειώθηκε εμφανώς στο σύνολο της περιοχής, με το μοντέλο να δίνει κατά μέσο όρο θετικό ρυθμό μεταβολής πυθμένα (προσάμμωση) ίσο με +9,7 mm/day. Παρόλα αυτά, στα σημεία ανάμεσα στους κυματοθραύστες, λόγω των έντονων βελοειδών ρευμάτων που επικρατούν, παρουσιάζονται τοπικά σημαντικοί ρυθμοί διάβρωσης με μέγιστη τιμή τα -274,6 mm/day.

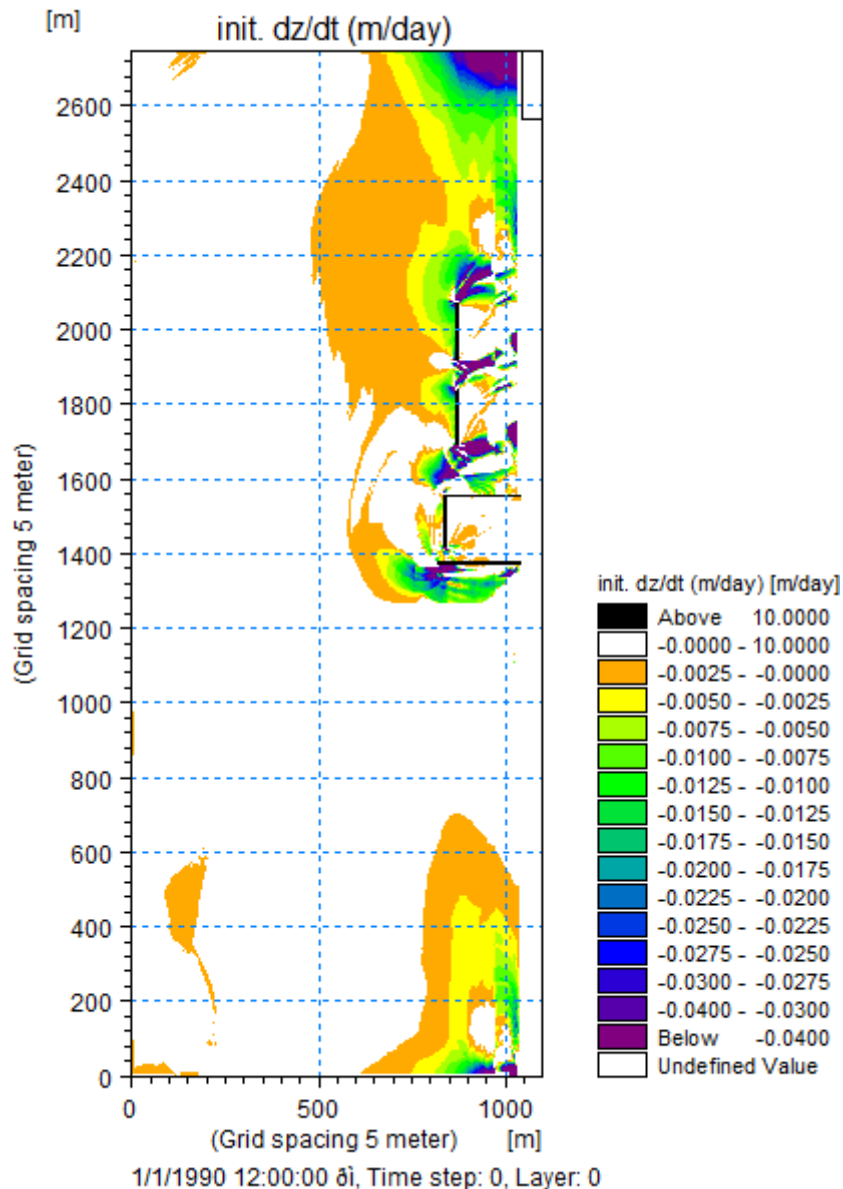


Σχήμα 6.4 Αποτέλεσμα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 1

Παρατηρείται στη συγκεκριμένη δοκιμή μία μορφολογική επανάληψη στη διάβρωση γύρω και πίσω από κάθε έναν από τους τρεις κυματοθραύστες που τοποθετήθηκαν. Επίσης, μετά το πέρας του συστήματος των κυματοθραυστών δημιουργείται τοπικά σημαντικό πρόβλημα στην μη προστατευόμενη περιοχή της ακτής. Συν τοις άλλοις, φαίνεται να υπάρχει σημαντική διάβρωση και στην περιοχή αμέσως μετά τον υπήνεμο μώλο της μαρίνας.

6.3 Αποτελέσματα Δοκιμής 2

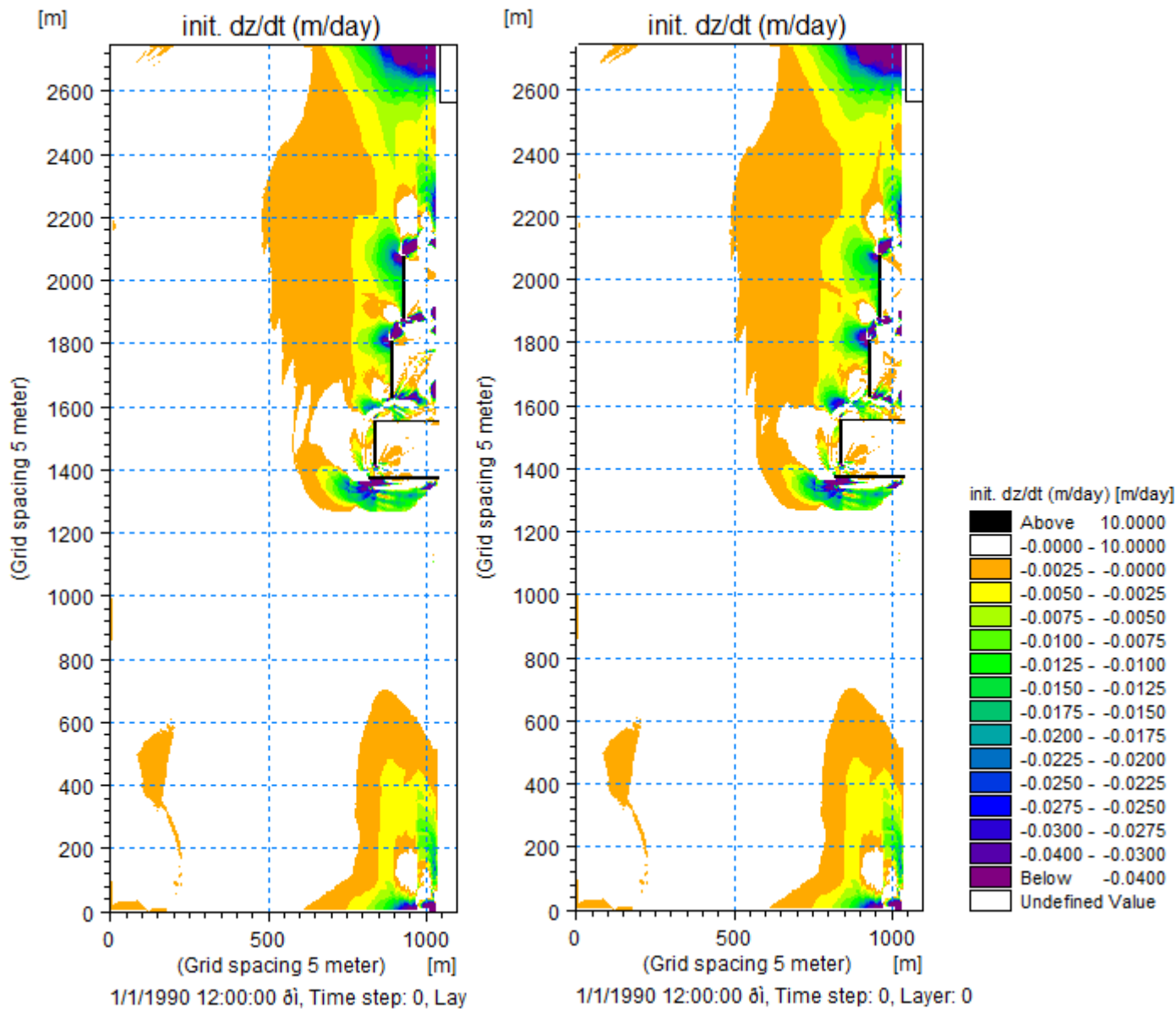
Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Δοκιμής 2 με δύο κυματοθραύστες. Η συγκεκριμένη δοκιμή δίνει παρόμοια αποτελέσματα στην υπό διάβρωση περιοχή με μέσο ρυθμό μεταβολής πυθμένα $+11,5 \text{ mm/day}$ και μέγιστη τοπική διάβρωση στο σημείο ανάμεσα στους δύο κυματοθραύστες ίση με $-275,9 \text{ mm/day}$. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αρκετή ομοιότητα με εκείνα της Δοκιμής 1, καθώς παρατηρείται στα ίδια σημεία τοπική διάβρωση, επανάληψη της μορφής της διάβρωσης γύρω από τους κυματοθραύστες και σημαντική ένταση διάβρωσης μετά το πέρας του συστήματος. Είναι εμφανές ότι η χρήση του τρίτου κυματοθραύστη δεν προσδίδει σημαντική βελτίωση στο πρόβλημα, συνεπώς εγκαταλείπεται καθώς κρίνεται μη αποδοτική και ακολουθεί δοκιμή με αλλαγή των γεωμετρικών στοιχείων των δύο κυματοθραυστών.



Σχήμα 6.5 Αποτέλεσμα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 2

6.4 Αποτελέσματα Δοκιμής 3 και 4

Με σκοπό να εξαλειφθούν εντελώς τα σημεία της ακτογραμμής που εντοπίζεται τοπικά διάβρωση αλλά και να περιορισθεί όσο γίνεται το πρόβλημα στα αμέσως κατάντη της μαρίνας έγιναν δύο δοκιμές με μικρότερη απόσταση στους κυματοθραύστες και τοποθέτησή τους πιο κοντά στη μαρίνα. Στην πρώτη δοκιμή οι κυματοθραύστες τοποθετήθηκαν βαθύτερα (Δοκιμή 3) σε σχέση με την ακτή, ενώ στη δεύτερη ρηχότερα (Δοκιμή 4) σε αποστάσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 6.6.

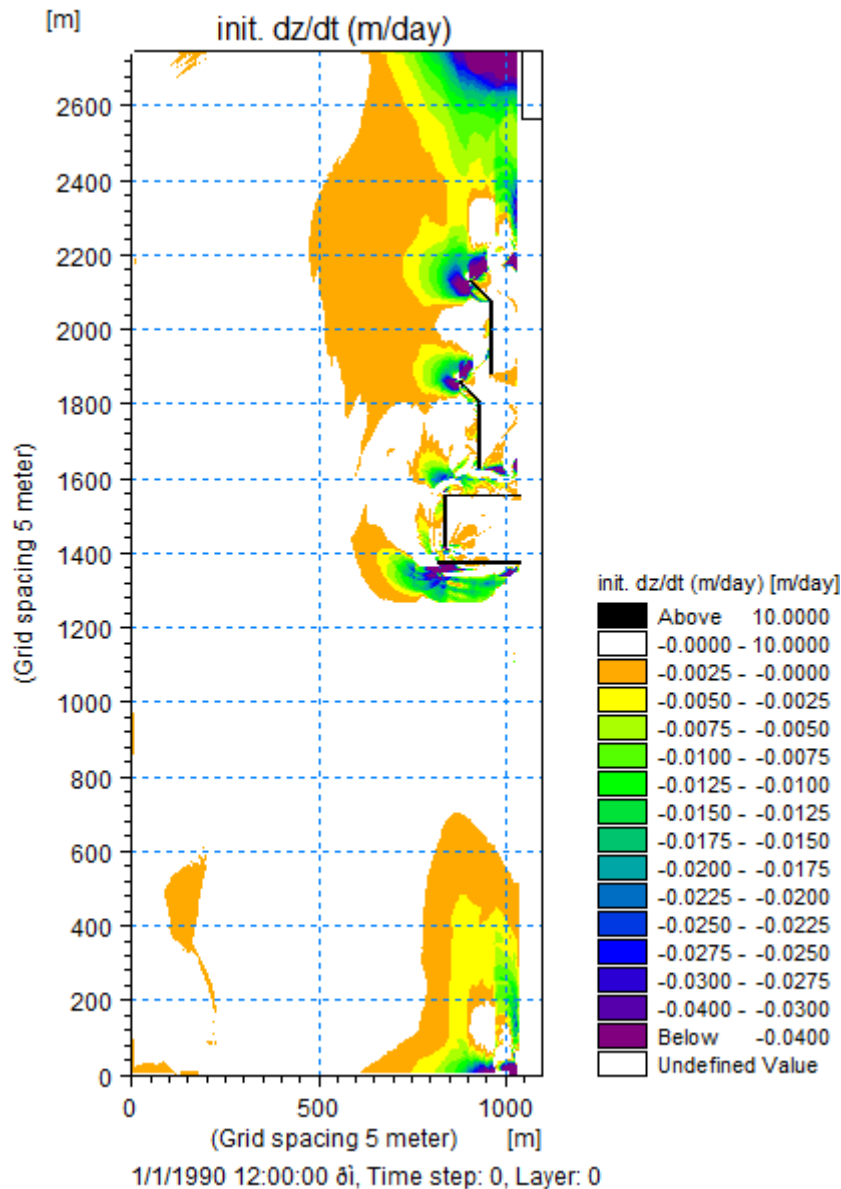


Σχήμα 6.6 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τις Δοκιμές 3 και 4 (αριστερά και δεξιά αντίστοιχα)

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.6, τα σημεία διάβρωσης μειώθηκαν αρκετά κατά το μήκος της ακτογραμμής όπως και αμέσως κατάντη της μαρίνας. Συγκεκριμένα στη Δοκιμή 3 παρατηρείται μέσος ρυθμός μεταβολής του πυθμένα +7,9 mm/day και μέγιστη τιμή τοπικής διάβρωσης -228,9 mm/day, τιμή σημαντικά μειωμένη σε σχέση με την αντίστοιχη των προηγούμενων δοκιμών. Στο ίδιο μήκος κύματος και οι τιμές της Δοκιμής 4 με μέσο ρυθμό +8,0 mm/day και μέγιστη διάβρωση -225,7 mm/day. Βέβαια, στη δεύτερη περίπτωση που το σύστημα κυματοθραυστών τοποθετείται σε μικρότερο βάθος παρατηρούνται στο Σχήμα 6.6 ελάχιστα λιγότερα σημεία έντονης τοπικής διάβρωσης, γι' αυτό και επιλέγεται αυτή η δοκιμή για περαιτέρω έρευνα στη συνέχεια.

6.5 Αποτελέσματα Δοκιμής 5

Σε αυτή τη δοκιμή επιλέγεται να προσαρμοσθεί το κατάντη άκρο των κυματοθραυστών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη εκτροπή της κυματικής ενέργειας από τον πρώτο κυματοθραύστη στο δεύτερο, καθοδήγηση της κατεύθυνσης της περίθλασης βαθύτερα και μείωση των δινών που δημιουργούνται από την πρόσπτωση των κυματισμών. Έτσι, διαμορφώθηκε το τμήμα με αλλαγή κλίσης στο άκρο των κυματοθραυστών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 5

Στη συγκεκριμένη δοκιμή παρατηρείται ότι απουσιάζουν σχεδόν τα σημεία έντονης διάβρωσης στο μήκος της ακτής. Στην υπήνεμη πλευρά των κυματοθραυστών δημιουργείται

προσάμμωση ενώ μόνο σε ένα σημείο μετά το πέρας των κυματοθραυστών παρατηρείται διάβρωση με μέγιστη τιμή -116,1 mm/day, σαφώς μειωμένη σε σχέση με όλες τις άλλες δοκιμές. Αποτέλεσμα λοιπόν είναι μία βέλτιστη λύση που αντιμετωπίζει αρκετά το πρόβλημα.

6.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την αντιμετώπιση της διάβρωσης

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των ρυθμών διάβρωσης για κάθε διάταξη που δοκιμάστηκε, καθώς και οι μέσες τιμές εγκάρσιας και κατά μήκος στερεομεταφοράς στην υπό διάβρωση περιοχή.

Πίνακας 6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς το μέγιστο ρυθμό διάβρωσης και τη στερεομεταφορά

	Μέγιστος ρυθμός διάβρωσης (mm/day)	Κατά μήκος στερεομεταφορά (m ³ /yr/m)	Εγκάρσια στερεομεταφορά (m ³ /yr/m)
Χωρίς έργα προστασίας	-23,3	798,9	59,7
Δοκιμή 1	-274,6	415,4	40,9
Δοκιμή 2	-275,9	447,8	49,6
Δοκιμή 3	-228,9	192,6	7,1
Δοκιμή 4	-225,7	197,6	4,7
Δοκιμή 5	-116,1	38,8	5,5

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, οι Δοκιμές 1 και 2 με σύστημα τριών και δύο όμοιων κυματοθραυστών αντίστοιχα, παρουσιάζουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Η σημαντική αύξηση του μέγιστου τοπικά ρυθμού διάβρωσης οφείλεται στο γεγονός ότι τοποθετήθηκαν οι κυματοθραύστες και έτσι δημιουργήθηκαν περιοχές ανάμεσα στα έργα έντονης κυματικής διεργασίας με μεγάλες τοπικές τιμές. Παρόλα αυτά, στο σύνολο της περιοχής που χρειάζεται προστασία παρατηρείται βελτιωμένη κατάσταση. Όσον αφορά την κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, που είναι και η κυριότερη, για τις Δοκιμές 1 και 2 παρουσιάζει μείωση περίπου στο 55% της αρχικής τιμής χωρίς τα έργα προστασίας. Αντίστοιχα, η εγκάρσια συνιστώσα μειώνεται στο 80% περίπου.

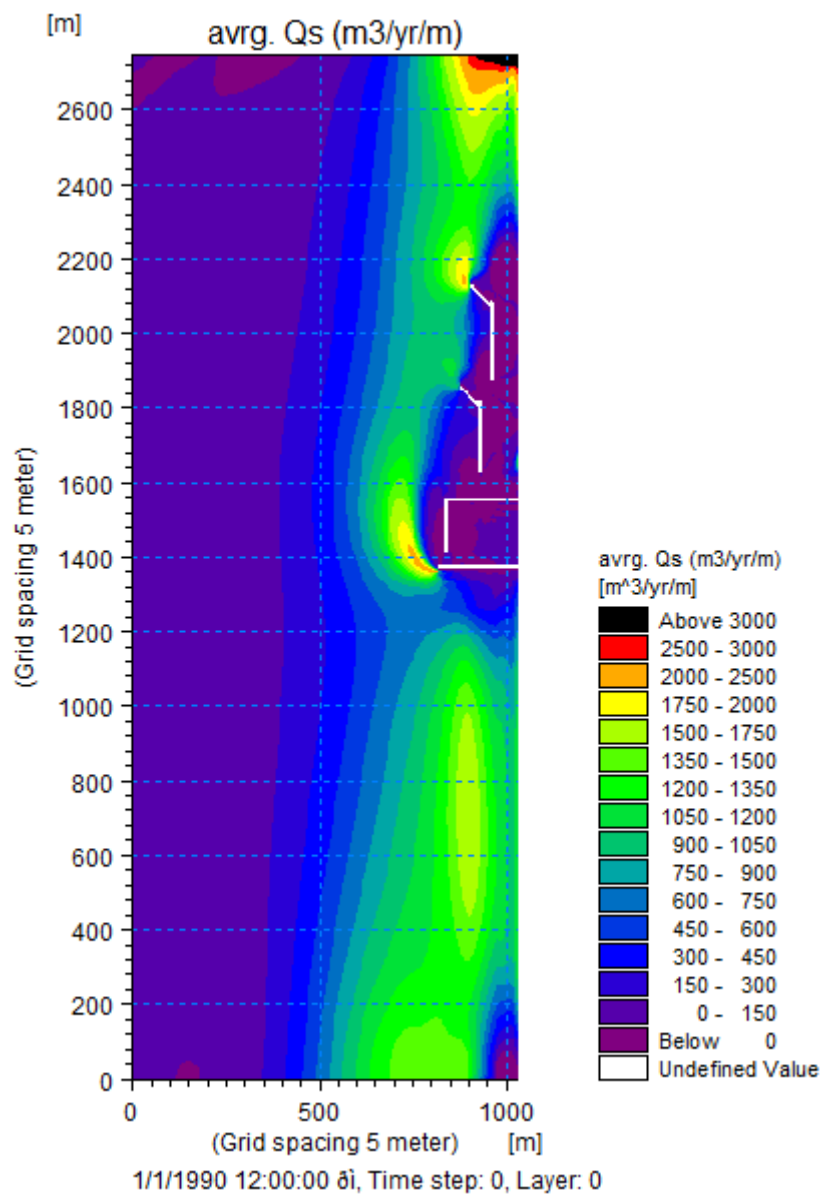
Οι Δοκιμές 3 και 4 βελτιώνουν αισθητά το πρόβλημα, κάτι που φαίνεται στις τιμές του μέγιστου ρυθμού διάβρωσης και των στερεομεταφορών. Συγκεκριμένα, η κατά μήκος συνιστώσα πέφτει στο 24% και η εγκάρσια περίπου στο 10% της αρχικής τιμής αντίστοιχα.

Τέλος, η Δοκιμή 5 που δίνει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα έχει εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα. Παρουσιάζει πολύ μικρότερο τοπικό ρυθμό διάβρωσης (-116,1 mm/day), τιμή που φανερώνει σημαντική μείωση των τοπικών δυσμενών κυματικών διεργασιών στην περιοχή ανάμεσα στους κυματοθραύστες. Η μέση τιμή για την κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά ανέρχεται μόλις στο 5% της αρχικής τιμής και η εγκάρσια στο 9%.

Παρότι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου δίνονται με μεγάλη επιφύλαξη, η ποιοτική ερμηνεία τους μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι πετυχαίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η επιθυμητή προστασία της ακτής από τη διάβρωση με τη διάταξη της Δοκιμής 5.

7. Διερεύνηση εφαρμογής μεθόδου sand by-pass

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια αρχικής διερεύνησης για την πιθανότητα εφαρμογής της μεθόδου sand by-pass, που περιγράφηκε αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, παράλληλα με τη διάταξη κυματοθραυστών της Δοκιμής 5 που έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Σκοπός είναι να αναδειχθούν οι βασικές παράμετροι του έργου που θα πρέπει να λάβει ο ερευνητής υπόψιν του. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η κατανομή της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής, η οποία προκαλεί και τη διάβρωση, για τη διάταξη κυματοθραυστών της Δοκιμής 5.



Σχήμα 7.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής για τη Δοκιμή 5

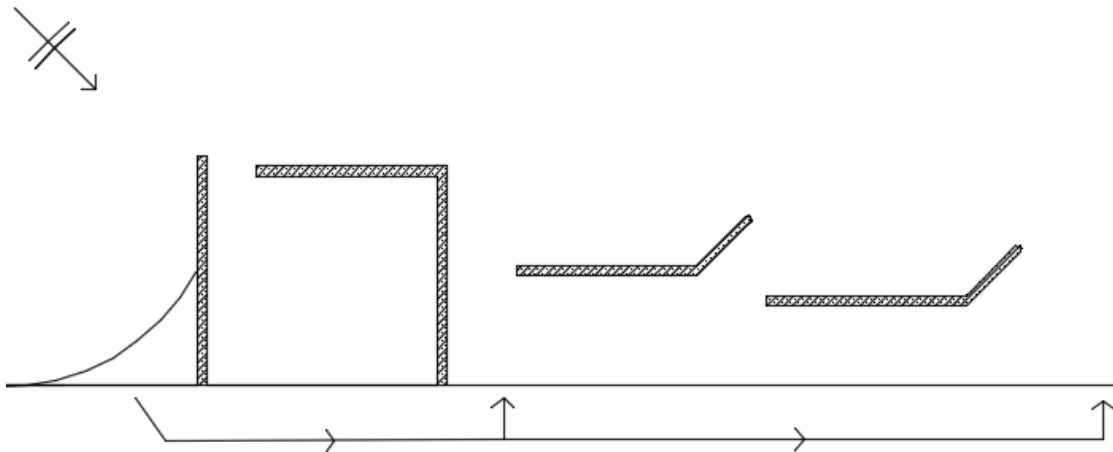
Η σημαντικότερη παράμετρος για ένα έργο τέτοιας φύσεως είναι ο υπολογισμός της παροχής σχεδιασμού του υλικού που θα μεταφέρεται από τα ανάντη της μαρίνας στην κατάντη περιοχή. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, για τη διάταξη κυματοθραυστών της Δοκιμής 5 η μέση τιμή της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής στα κατάντη της μαρίνας λαμβάνει τιμή $38,8 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ πλάτους. Αν θεωρηθεί ότι η στερεομεταφορά πραγματοποιείται σε μία περιοχή πλάτους 110 m περίπου (όσο το πλάτος της ζώνης στην υπήνεμη πλευρά των κυματοθραυστών), τότε η συνολική κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά ανέρχεται σε $4268 \text{ m}^3/\text{yr}$. Αντίστοιχα, η εγκάρσια στερεομεταφορά έχει μέση τιμή $5,5 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ πλάτους και επιτελείται κυρίως στην περιοχή αμέσως κατάντη της μαρίνας, στο χώρο ανάμεσα στους κυματοθραύστες και στην περιοχή μετά τα έργα προστασίας. Θεωρώντας συνολικό πλάτος ίσο με 200 m, η συνολική εγκάρσια συνιστώσα της στερεομεταφοράς είναι $1100 \text{ m}^3/\text{yr}$. Συνεπώς, η συνολική παροχή ιζήματος που χρειάζεται να μεταφέρεται από τα ανάντη στα κατάντη είναι περίπου $7000 \text{ m}^3/\text{yr}$ με συνυπολογισμό συντελεστή ασφαλείας 1,3. Στα ανάντη της μαρίνας, η τιμή της παράλληλης συνιστώσας της στερεομεταφοράς που προκαλεί προσάμμωση είναι περίπου $78500 \text{ m}^3/\text{yr}$. Σε μία τέτοια περίπτωση, η εφαρμογή της μεθόδου sand by-pass θα αποφόρτιζε ταυτόχρονα και το ανάντη τμήμα κατά ένα ποσοστό 10% όταν το έργο θα είναι σε πλήρη λειτουργία και, ταυτόχρονα, θα εξασφαλίζει την ακεραιότητα της κατάντη ακτής σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Σε δεύτερο στάδιο, θα πρέπει να αποφασιστεί ο τρόπος συλλογής και μεταφοράς του ιζήματος. Όπως περιγράφηκε αναλυτικώς σε προηγούμενο κεφάλαιο, υπάρχουν πολλές τεχνικές για αυτή τη διαδικασία, αναλόγως τις συνθήκες περιβάλλοντος του έργου, το κόστος και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Εφόσον πρόκειται για έργο μικρής εμβέλειας και προς αποφυγή κατασκευής περαιτέρω έργων συγκέντρωσης του ιζήματος (κυματοθραύστες, διαμόρφωση μαρίνας, κλπ.), που θα επιβαρύνουν τον προϋπολογισμό του συνολικού παράκτιου έργου, η οικονομικότερη λύση θα ήταν η κατασκευή σκάμματος συγκέντρωσης του υλικού και η αναρρόφησή του από εκεί με κατάλληλα μηχανήματα.

Η μεταφορά του ιζήματος στην κατάντη ζώνη θα μπορούσε να γίνει οδικώς με χρήση μεταφορές υλικού. Σε διαφορετική περίπτωση, θα μπορούσε να γίνει μία τεχνικοοικονομική διερεύνηση για την πιθανότητα κατασκευής αγωγού μεταφοράς του υλικού είτε μέσω της ξηράς, είτε υποθαλάσσια. Ως προς τη θέση απόληξης του υλικού, το σωστό θα ήταν να γίνει στα σημεία που προκαλείται έντονη διάβρωση. Η πρώτη επιλογή θα ήταν να αποτίθεται όλη η ποσότητα ιζήματος αμέσως κατάντη της μαρίνας, εκεί όπου εντοπίζεται ο πρώτος πυρήνας διάβρωσης (Σχήμα 6.7) και να αφήνεται να διασκορπισθεί στην υπόλοιπη παράκτια ζώνη μέσω των φυσικών μηχανισμών στερεομεταφοράς. Η διαδικασία αυτή όμως ίσως συναντήσει δυσκολίες, λόγω της παρουσίας των κυματοθραυστών που περιορίζουν τους παράκτιους μηχανισμούς και λόγω της διαμόρφωσης των σχηματισμών salient που προαναφέρθηκαν. Κατά πάσα πιθανότητα, οι συνθήκες θα οδηγούσαν τελικώς στον εγκλωβισμό του μεταφερόμενου ιζήματος ανάμεσα στη μαρίνα και στους κυματοθραύστες χωρίς να επιτυγχάνεται επαρκής τροφοδοσία της υπόλοιπης παράκτιας ζώνης με το απαραίτητο ίζημα. Μία δεύτερη λύση, μάλλον αποτελεσματικότερη, θα ήταν να πραγματοποιείται απόθεση του υλικού σε δύο διαφορετικές θέσεις κατάντη (Σχήμα 7.2), μία αμέσως κατάντη της μαρίνας και μία δεύτερη μετά το πέρας του συστήματος κυματοθραυστών στην περιοχή που μένει

απροστάτευτη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7 στο συγκεκριμένο σημείο, σε απόσταση 550 m περίπου από τον υπήνεμο μώλο της μαρίνας, εντοπίζεται ο δεύτερος πυρήνας διάβρωσης, εφόσον παύουν να υπάρχουν πια τα έργα προστασίας και δημιουργούνται έντονα παράκτια ρεύματα από τη θραύση των κυματισμών που ευνοούν τη στερεομεταφορά. Έτσι, θα υπήρχε μία αρκετά καλή προστασία έναντι διάβρωσης ολόκληρης της παράκτιας ζώνης κατάντη του λιμενικού έργου, μέχρι το σημείο εκείνο που η παρουσία του δεν επηρεάζει πια την ακτογραμμή.

Εν κατακλείδι, έγινε μία προσπάθεια να ερευνηθούν οι βασικότερες παράμετροι για την εφαρμογή της μεθόδου sand by-pass σε μία περιοχή αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία. Τονίζεται ξανά, ότι πρόκειται για μέθοδο εναλλακτική που δεν έχει εφαρμοσθεί αρκετά στην πράξη, ώστε να υπάρχουν δεδομένα για την περαιτέρω μελέτη της. Σε κάθε περίπτωση ο εκάστοτε ερευνητής οφείλει, πέρα από την υπολογιστική προσομοίωση, να βασιστεί σε πειραματικές διαδικασίες σε πραγματικές συνθήκες, ανάλογα με το έργο και την περιοχή που εφαρμόζεται. Επίσης, ένα εγχείρημα τέτοιου τύπου σημαντικό είναι να εξετασθεί και από οικονομικής πλευράς, συνυπολογίζοντας την απόδοσή του στην πράξη.



Σχήμα 7.2 Σκαρίφημα κατεύθυνσης μεταφερόμενου ιζήματος στη μέθοδο sand by-pass

8. Συμπεράσματα και προτάσεις

8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε σε πρώτη φάση διερεύνηση ως προς το μέγεθος και τη θέση της παράκτιας διάβρωσης σε μία ακτογραμμή που βρίσκεται κοντά σε ένα τυπικό λιμενικό έργο, όπως είναι μία μαρίνα σκαφών αναψυχής. Σε δεύτερο στάδιο, εφαρμόστηκαν προτάσεις αντιμετώπισης του προβλήματος, αναζητώντας τη βέλτιστη λύση κάνοντας χρήση διάφορων διατάξεων έξαλλων κυματοθραυστών. Τέλος, έγινε μία προσπάθεια να υπολογισθούν και να προταθούν οι βασικές παράμετροι για την εφαρμογή μεθόδου sand bypass για την αναπλήρωση της ακτής.

Τα συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Σε μία παράκτια περιοχή στην οποία κατασκευάζεται ένα τεχνικό έργο πάσης φύσεως που αλλάζει τις συνθήκες ροής και επηρεάζει τις κυματικές διεργασίες, τα ρεύματα και τη συνεπαγόμενη στερεομεταφορά είναι αναπόφευκτη η διάβρωση που θα δημιουργηθεί στα κατάντη τμήματα. Η ένταση και η έκταση της διάβρωσης είναι ανάλογη του μεγέθους και της μορφής του τεχνικού έργου, του κυματικού κλίματος της περιοχής, της διαθεσιμότητας και των χαρακτηριστικών του ιζήματος, καθώς και πλήθος άλλων δευτερευόντων παραμέτρων. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί εύκολα να υπολογιστεί και να προβλεφθεί επακριβώς η απόκριση της ακτογραμμής σε βάθος χρόνου, παρά μόνον να εκτιμηθεί ως ένα βαθμό μέσα από συνεχείς μελέτες, πειραματικές μετρήσεις σε φυσική κλίμακα, συγκρίσεις με ανάλογες περιοχές. Η ανάγκη, όμως, προστασίας της ακτής έναντι διάβρωσης είναι δεδομένη και δεν θα πρέπει να αμελείται για να αποφεύγονται σημαντικά προβλήματα λειτουργίας και ασφάλειας στην γειτονία παράκτιων τεχνικών έργων.
- Σε ένα σύστημα παράλληλων κυματοθραυστών που λειτουργεί για την προστασία της ακτής έναντι διάβρωσης σημαντικότερο ρόλο παίζουν οι αποστάσεις ανάμεσα στους κυματοθραύστες, η χωροθέτησή τους σε σχέση με το προσπίπτον κύμα και η διαμόρφωση της επιφάνειας και του σχήματός τους, ιδιαίτερα στα ακρομώλια, όπου δημιουργούνται σημαντικές απότομες μεταβολές στην ταχύτητα και στη διεύθυνση της ροής. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η απόσταση ανάμεσα στα έργα να είναι περίπου το 35% του μήκους του κυματοθραύστη, ώστε να μην επιτρέπεται σε μεγάλη ποσότητα ιζήματος να απομακρύνεται από την ακτή μέσω της εγκάρσιας συνιστώσας της στερεομεταφοράς που προκαλούν τα βελοειδή ρεύματα. Ομοίως, το σύστημα των κυματοθραυστών πρέπει να απέχει μικρή απόσταση από το λιμενικό έργο, διότι σε εκείνο το σημείο εντοπίζεται έντονη διάβρωση, για τους λόγους που περιγράφηκαν.
- Οι κυματοθραύστες προτείνεται να τοποθετούνται σε διαφορετική - κλιμακωτή - απόσταση έκαστος από την ακτή (όπως η διάταξη της Δοκιμής 3), ώστε να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικότερα τον προσπίπτοντα κυματισμό. Προσοχή, όμως,

στην διαφορά των αποστάσεων για να εξασφαλίζεται η λειτουργία των κυματοθραυστών ως σύστημα και όχι ως μεμονωμένων έργων.

- Οι κυματοθραύστες πρέπει να τοποθετούνται με κατάλληλη κλίση ως προς το προσπίπτον κύμα, έτσι ώστε να εκτρέπουν την κυματική δράση στα ανοιχτά, περιορίζοντας τη στερεομεταφορά στην ακτή, και ταυτόχρονα να προστατεύουν το ίζημα που βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά τους. Η διαμόρφωση στα ακρομώλια με μεγαλύτερη κλίση από τον κορμό του έργου ενθαρρύνεται και πρέπει να γίνεται, έτσι ώστε να εξομαλύνεται στα συγκεκριμένα σημεία η κυματική ενέργεια. Προτείνεται αλλαγή κλίσης μέχρι 45° σε σχέση με την διεύθυνση του κύματος, διότι μεγαλύτερες γωνίες δεν οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα δημιουργώντας προσαμμώσεις στο μέτωπο του κυματοθραύστη.

8.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όσον αφορά μελλοντικές έρευνες και περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος γίνονται οι εξής προτάσεις:

- Η διάταξη της Δοκιμής 5 με αλλαγή κλίσης στα ακρομώλια των κυματοθραυστών αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω και να δοκιμασθεί σε πραγματικές συνθήκες, καθώς φαίνεται να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επειδή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δυστυχώς, δεν ήταν δυνατό να γίνουν αξιόπιστες δοκιμές ως προς τη βέλτιστη γωνία για την αλλαγή κλίσης και δοκιμάστηκε μόνον 45° καλό θα ήταν να διερευνηθεί περαιτέρω το συγκεκριμένο στοιχείο.
- Αξίζει να εξετασθεί εις βάθος, αρχικά σε πειραματικό στάδιο και στη συνέχεια σε πραγματικά έργα, η εφαρμογή της μεθόδου sand by-pass. Ελέγχεται η οικονομική αποδοτικότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος, όμως σε παράκτιες περιοχές μεγάλης έκτασης και έντονου προβλήματος διάβρωσης είναι αδιαμφισβήτητα μία υπολογίσιμη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Στα πλεονεκτήματά της σίγουρα ότι δεν απαιτεί επιπλέον τεχνικά έργα, ότι αποτελεί μία οικολογική - ήπιας μορφής - λύση χωρίς επιβαρυντικές παρεμβάσεις στο περιβάλλον και ότι μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά σε μεγαλύτερη ή μικρότερη ισχύ, ανάλογα με τις απαιτήσεις και το μέγεθος της διάβρωσης.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνικές

- Αγγελέρου Π., 2013, *Αριθμητική προσομοίωση υδροδυναμικού πεδίου και κίνησης ιζήματος σε ακτή τύπου θύλακα*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αφεντούλης Β., 2013, *Αριθμητική διερεύνηση της εντατικοποίησης της κυματικής δράσης στα κατάντη μόλου λιμένα*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Δασκαλάκης Μ., 2009, *Λιμάνια, θαλάσσια κύματα, λιμενικά έργα*, Αθήνα
- Καζάκης Ι., 2014, *Αριθμητική προσομοίωση κυματισμού σε περιοχές μεταβαλλόμενης βαθυμετρίας με χρήση του αριθμητικού κυματικού μοντέλου MIKE 21 by DHI*, Μεταπτυχιακή εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη», ΕΜΠ
- Καλογήρου Μ., 2014, *Εκτίμηση της στερεοπαροχής κατά μήκος του ποταμού Αράχθου και των επιπτώσεων στην παράκτια ζώνη*, Μεταπτυχιακή εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Κονισπολιάτης Ν., 2009, *Παράκτιο Περιβάλλον*, Σημειώσεις μαθήματος του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Κουτίτας Χ., 1998, *Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα*, Θεσσαλονίκη
- Μαυραντωνάκης Α., 2013, *Διερεύνηση σχεδιασμού διάταξης μαρίνας σε σχέση με τη στερεομεταφορά στην είσοδο και προτάσεις βελτίωσης*, Μεταπτυχιακή εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Μέμος Κ., 1992, *Μαθήματα λιμενικών έργων*, Αθήνα
- Μέμος Κ., 2008, *Εισαγωγή στα λιμενικά έργα*, Αθήνα
- Μέμος Κ., 2009, *Ολοκληρωμένη διαχείριση παράκτιας ζώνης*, Σημειώσεις μαθήματος του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Μουτζούρης Κ., 2005, *Εισαγωγή στην ακτομηχανική*, Σημειώσεις Πολυτεχνείου για το μάθημα «Ακτομηχανική», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα
- Μουτζούρης Κ., 2009, *Θαλάσσια υδραυλική*, Σημειώσεις Πολυτεχνείου για το μάθημα «Θαλάσσια Υδραυλική και Λιμενικά Έργα», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα

- Νικολάου Ε., 2014, *Αριθμητική διερεύνηση απόδοσης συστήματος κυματοθραυστών*, Μεταπτυχιακή εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Παναγιωτίδης Π. & Χατζημήπιρος Κ., 2004, *Παράκτια οικοσυστήματα και ανθρωπογενείς πιέσεις στις ακτές*, ΕΛΚΕΘΕ, Αθήνα
- Σοφιαδέλη Δ., 2014, *Διερεύνηση συνθηκών στερεομεταφοράς και κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρινών*, Μεταπτυχιακή εργασία του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ

Διεθνείς

- American Society of Civil Engineers (ASCE), 1994, *Coastal Groins and Nearshore Breakwaters*, ASCE, New York.
- Battjes J.A. & Janssen J.P.F.M., 1978, *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg
- Berckhoff J.C.W., 1972, *Computation of combined refraction-diffraction*, Proceedings of the 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver
- Dean R.G. & Dalrymple R.A., 1984, *Water Mechanics for Engineers and Scientists*, New Jersey
- DHI, 2007, *User Guide and Reference Manual*, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark
- Kamphuis W., 1991, *Alongshore Sediment Transport Rate*, Journal of Waterway Port Coastal and Oceanic Engineering, Vol. 117, No. 6
- Kirby J.T., 1986, *Rational Approximations in the Parabolic Equation Method for Water Waves*, Coastal Engineering, Vol. 10
- Le Blond P.H., Mysak L.A., 1978, *Waves in the ocean*, Elsevier Oceanography Series
- Longuet-Higgins M.S., 1970, *Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves*, Journal of Geophysical Research, Vol. 75, No. 33
- Massel S.R., 1989, *Hydrodynamics of coastal zones*, Elsevier Oceanography Series
- Meer J. W., 1995, *Conceptual design of rubble mound breakwaters*
- Phillips O.M., 1977, *The dynamics of the upper ocean*, Cambridge University Press
- PIANC, 2009, *Impact of a marina on an adjacent coast*, Brussels

Pilarczyk K. W., 2003, *Design of low crested (submerged) structures*, 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo

Pilarczyk K. W., 2003, *Alternative systems for coastal protection*, International Conference on Estuaries and Coasts, Hangzhou

Reeve D., Chadwick A. and Fleming C., 2004, *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*, New York

Swart D.H., 1974, *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*, WL Delft Hydraulics Publication No. 131, Delft

USACE (US Army Corps of Engineers), 2006, *Coastal Engineering Manual (CEM)*

Διαδικτυακές (τελευταία πρόσβαση Μάιος 2015)

blog.ltc.mq.edu.au

chl.erdc.usace.army.mil

dSPACE.lib.ntua.gr

ecourses.dbnet.ntua.gr

el.wikipedia.org

postgra.hydro.ntua.gr

www.aquazone.gr

www.coastalwiki.org

www.escp.org.uk

www.fast.u-psud.fr

www.gldd.com

www.hydrosurveys.co.uk

www.kennisbank-waterbouw.nl

www.marbef.org (Marine Biodiversity)

www.mikepoweredbydhi.com

www.panoramio.com

www.pixgood.com

www.southwestcoastalgroup.org

www.sunshinecoast.qld.gov.au

www.tweedsandbypass.nsw.gov.au

www6.plymouth.ac.uk

Παράρτημα: Παρουσίαση αποτελεσμάτων λογισμικού MIKE 21

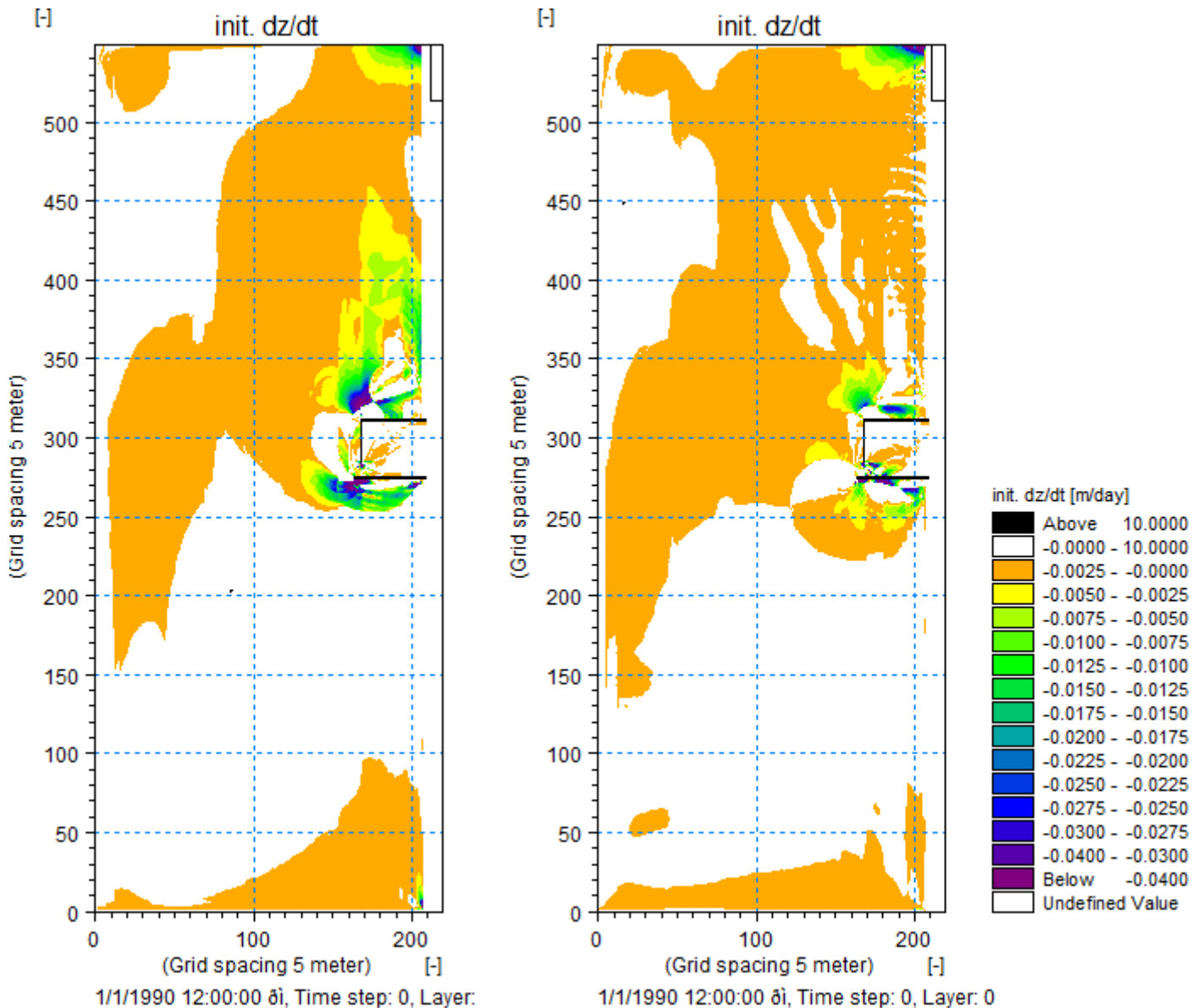
Διάταξη μαρίνας 1

Πρώτο κυματικό σενάριο

$H_{rms}=2\text{ m}$, $T_p=6\text{ s}$, $\theta=45^\circ$

Δεύτερο κυματικό σενάριο

$H_{rms}=2,5\text{ m}$, $T_p=6,5\text{ s}$, $\theta=10^\circ$



Σχήμα Α.1 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο πρώτο κυματικό σενάριο

Σχήμα Α.2 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 1 στο δεύτερο κυματικό σενάριο

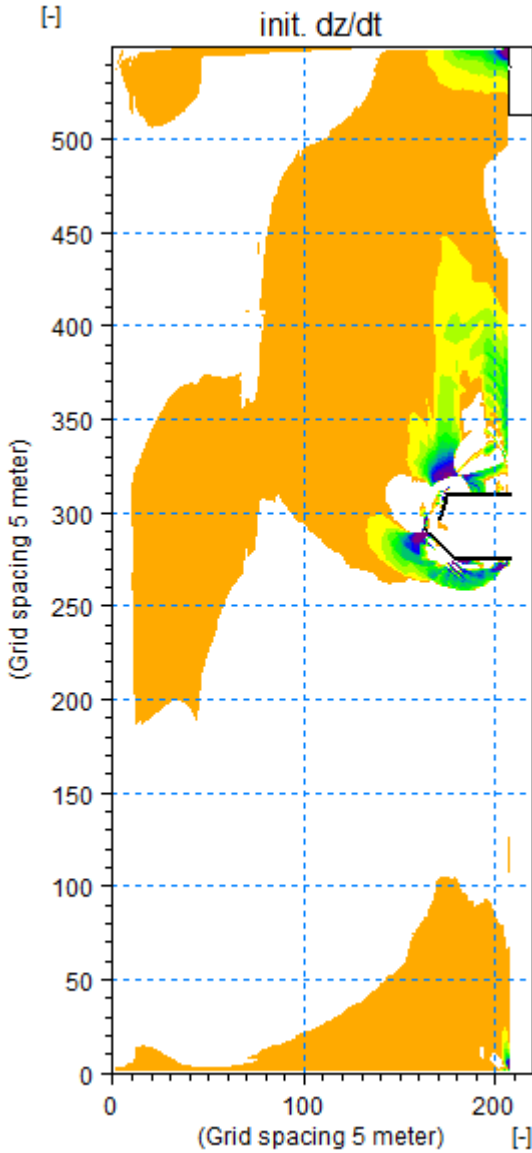
Διάταξη μαρίνας 2

Πρώτο κυματικό σενάριο

Δεύτερο κυματικό σενάριο

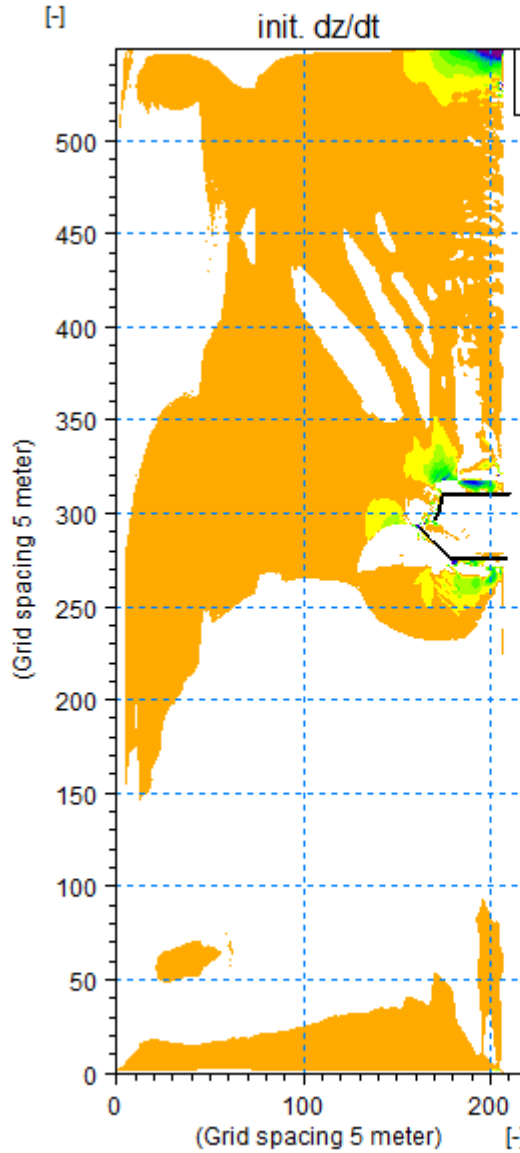
$H_{rms}=2\text{ m}$, $T_p=6\text{ s}$, $\theta=45^\circ$

$H_{rms}=2,5\text{ m}$, $T_p=6,5\text{ s}$, $\theta=10^\circ$



1/1/1990 12:00:00 δι, Time step: 0, Layer: 0

Σχήμα A.3 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 2 στο πρώτο κυματικό σενάριο



1/1/1990 12:00:00 δι, Time step: 0, Layer: 0

Σχήμα A.4 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 2 στο δεύτερο κυματικό σενάριο

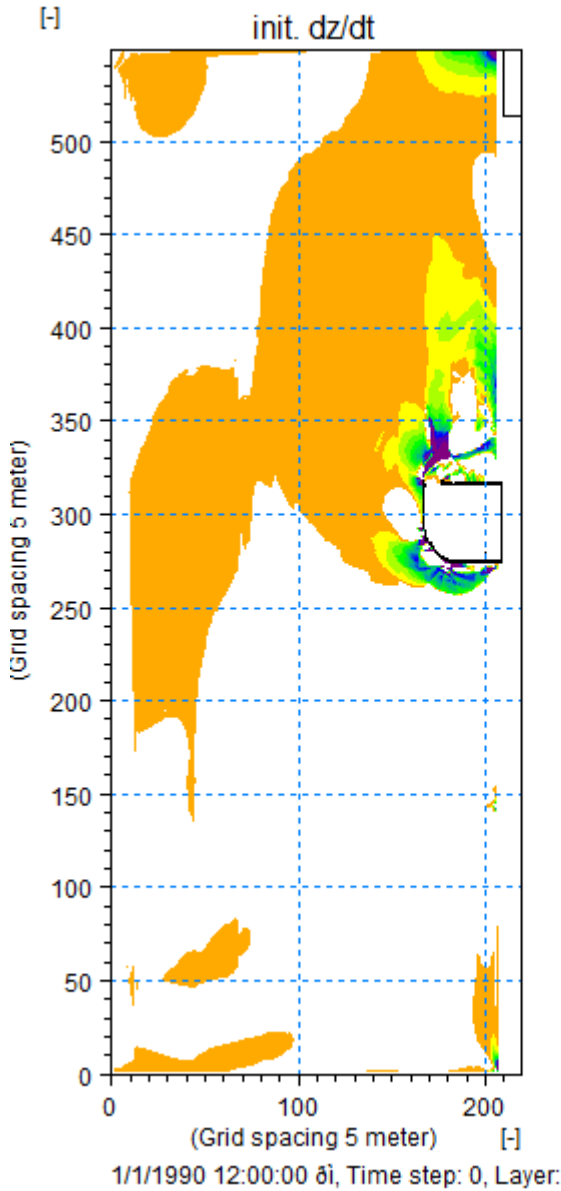
Διάταξη μαρίνας 3

Πρώτο κυματικό σενάριο

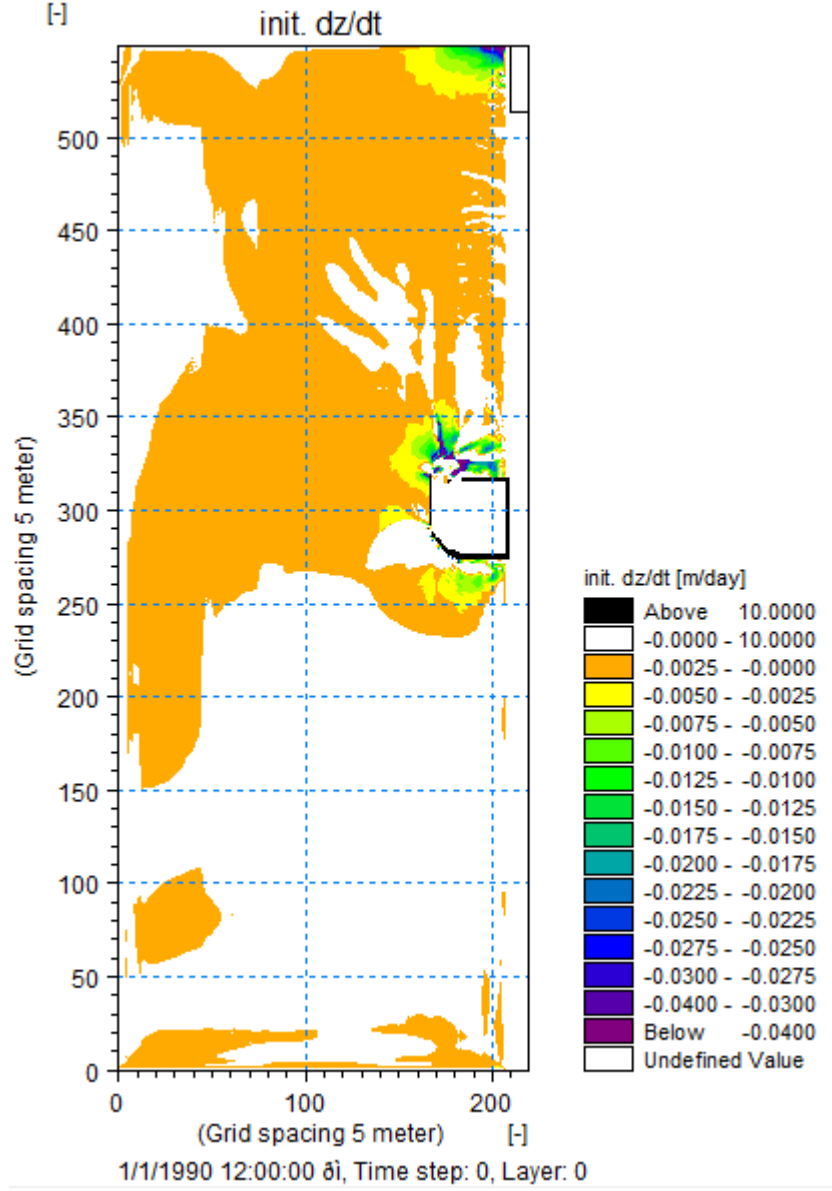
Δεύτερο κυματικό σενάριο

$H_{rms}=2\text{ m}$, $T_p=6\text{ s}$, $\theta=45^\circ$

$H_{rms}=2,5\text{ m}$, $T_p=6,5\text{ s}$, $\theta=10^\circ$



Σχήμα A.5 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 3 στο πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα A.6 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 3 στο δεύτερο κυματικό σενάριο

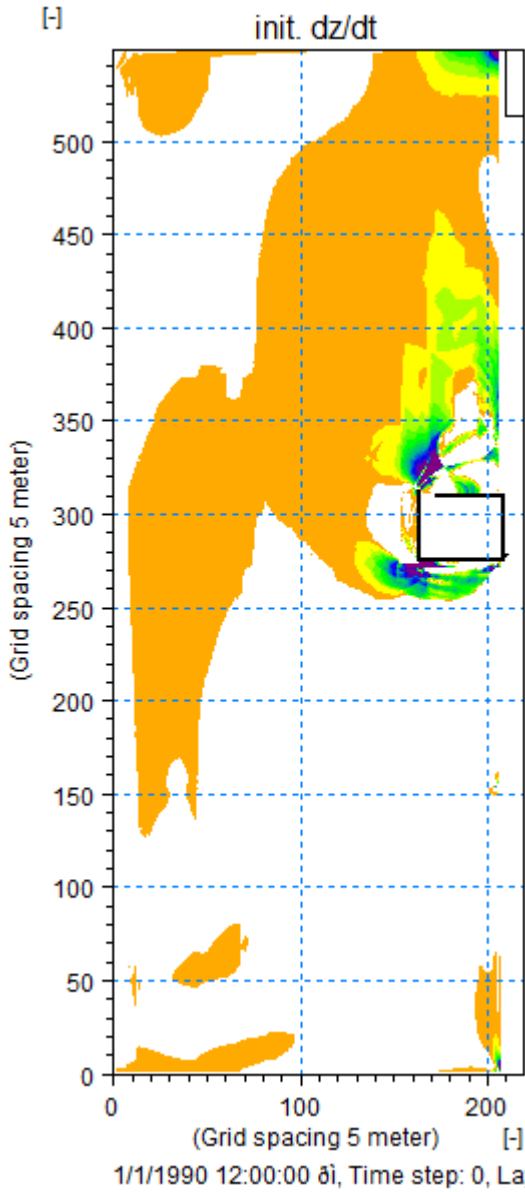
Διάταξη μαρίνας 4

Πρώτο κυματικό σενάριο

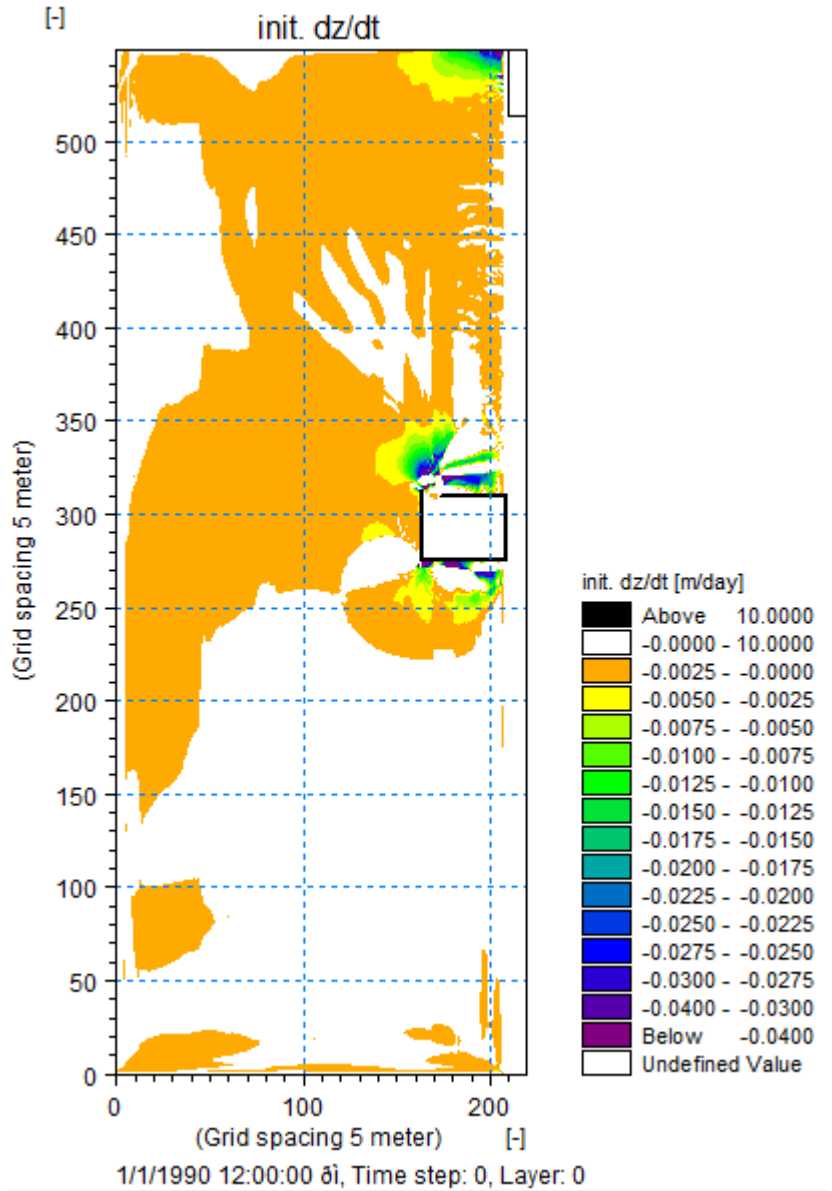
Δεύτερο κυματικό σενάριο

$H_{rms}=2\text{ m}, T_p=6\text{ s}, \theta=45^\circ$

$H_{rms}=2,5\text{ m}, T_p=6,5\text{ s}, \theta=10^\circ$



Σχήμα A.7 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 4 στο πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα A.8 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 4 στο δεύτερο κυματικό σενάριο

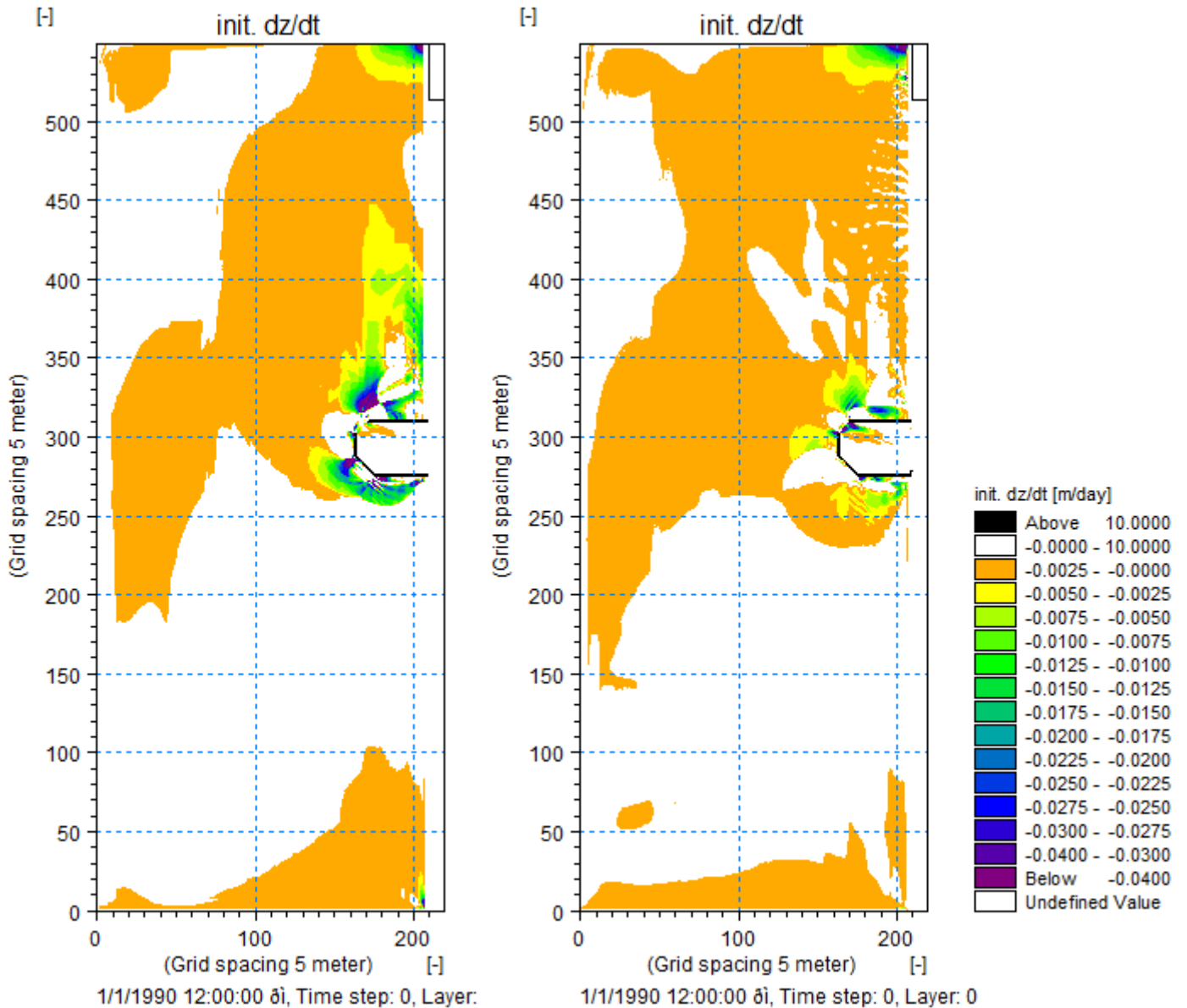
Διάταξη μαρίνας 5

Πρώτο κυματικό σενάριο

Δεύτερο κυματικό σενάριο

$H_{rms}=2\text{ m}$, $T_p=6\text{ s}$, $\theta=45^\circ$

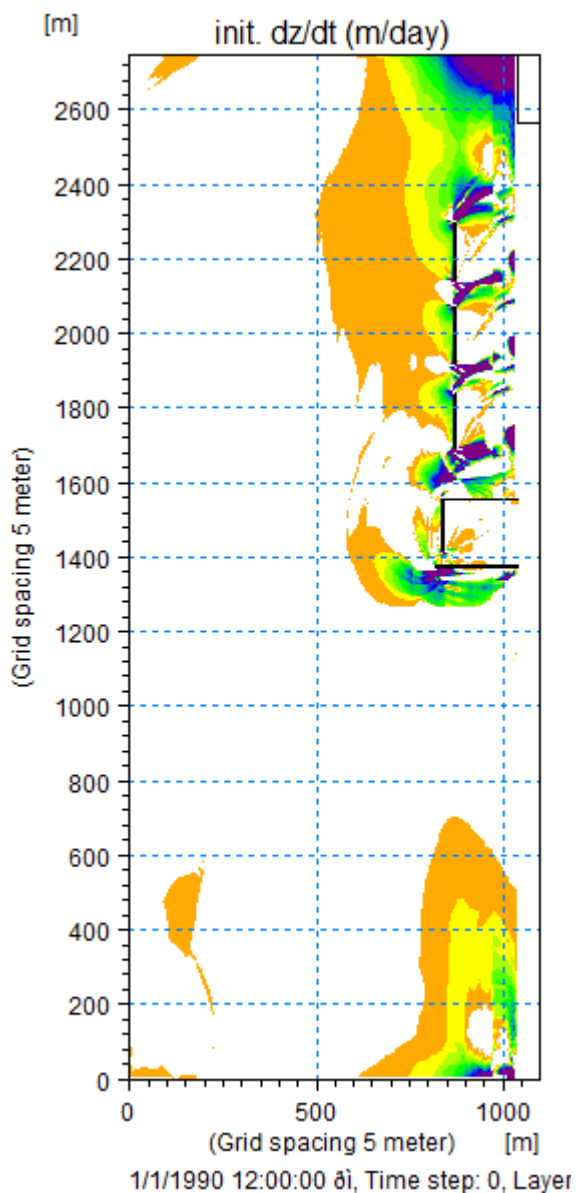
$H_{rms}=2,5\text{ m}$, $T_p=6,5\text{ s}$, $\theta=10^\circ$



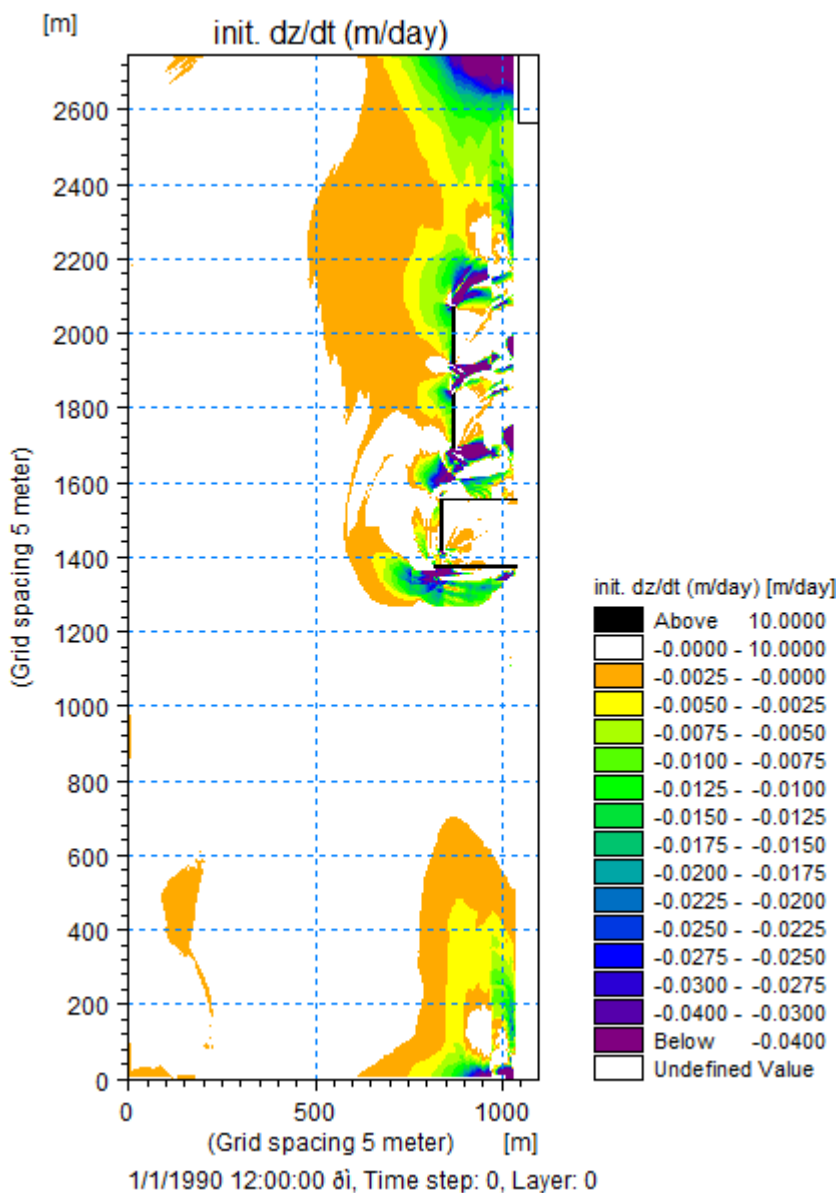
Σχήμα A.9 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 5 στο πρώτο κυματικό σενάριο

Σχήμα A.10 Ρυθμός μεταβολής (διάβρωσης) πυθμένα dz/dt (m/day) για τη διάταξη μαρίνας 5 στο δεύτερο κυματικό σενάριο

Δοκιμή 1 και 2

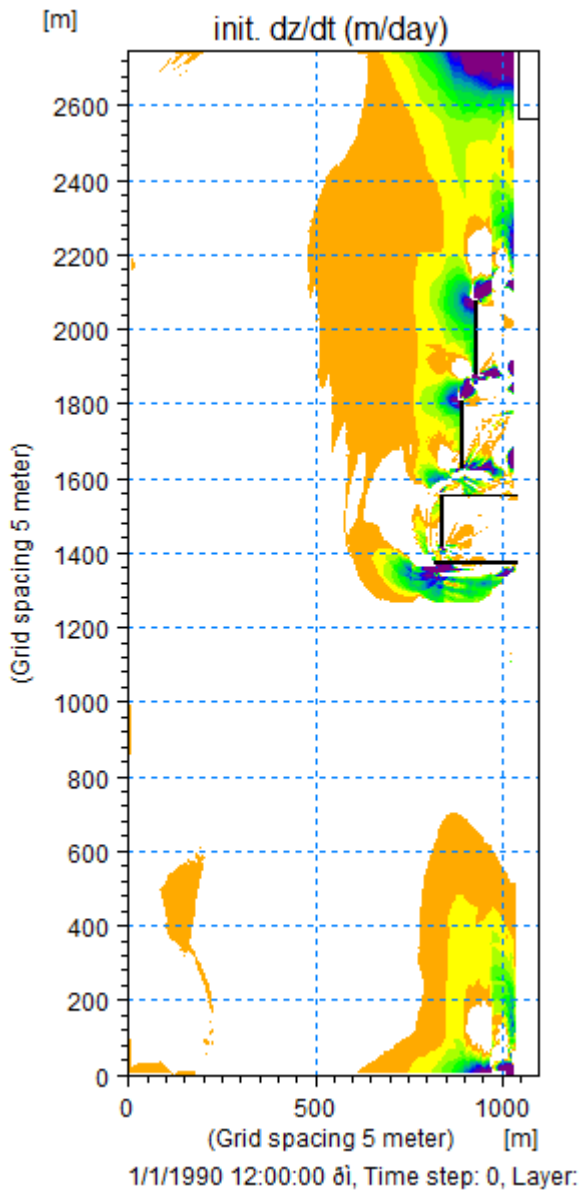


Σχήμα A.11 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 1

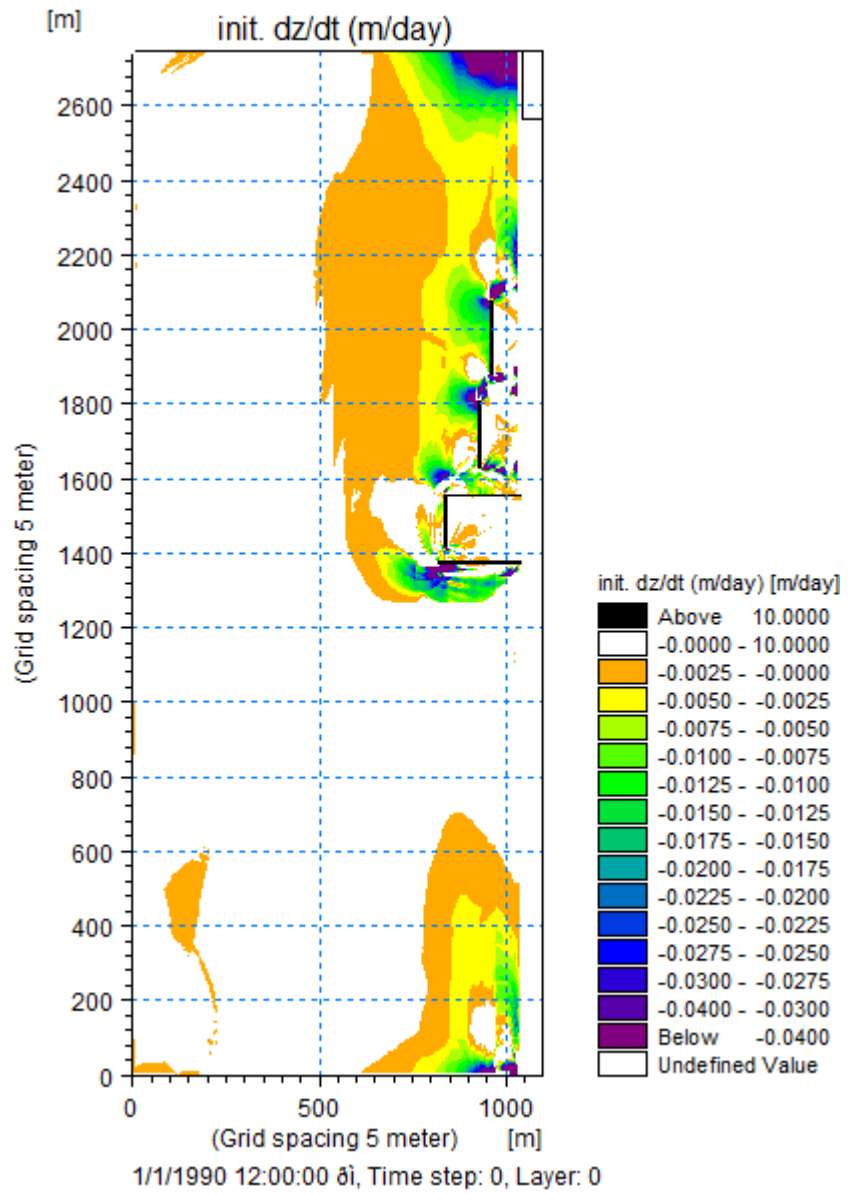


Σχήμα A.12 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 2

Δοκιμή 3 και 4

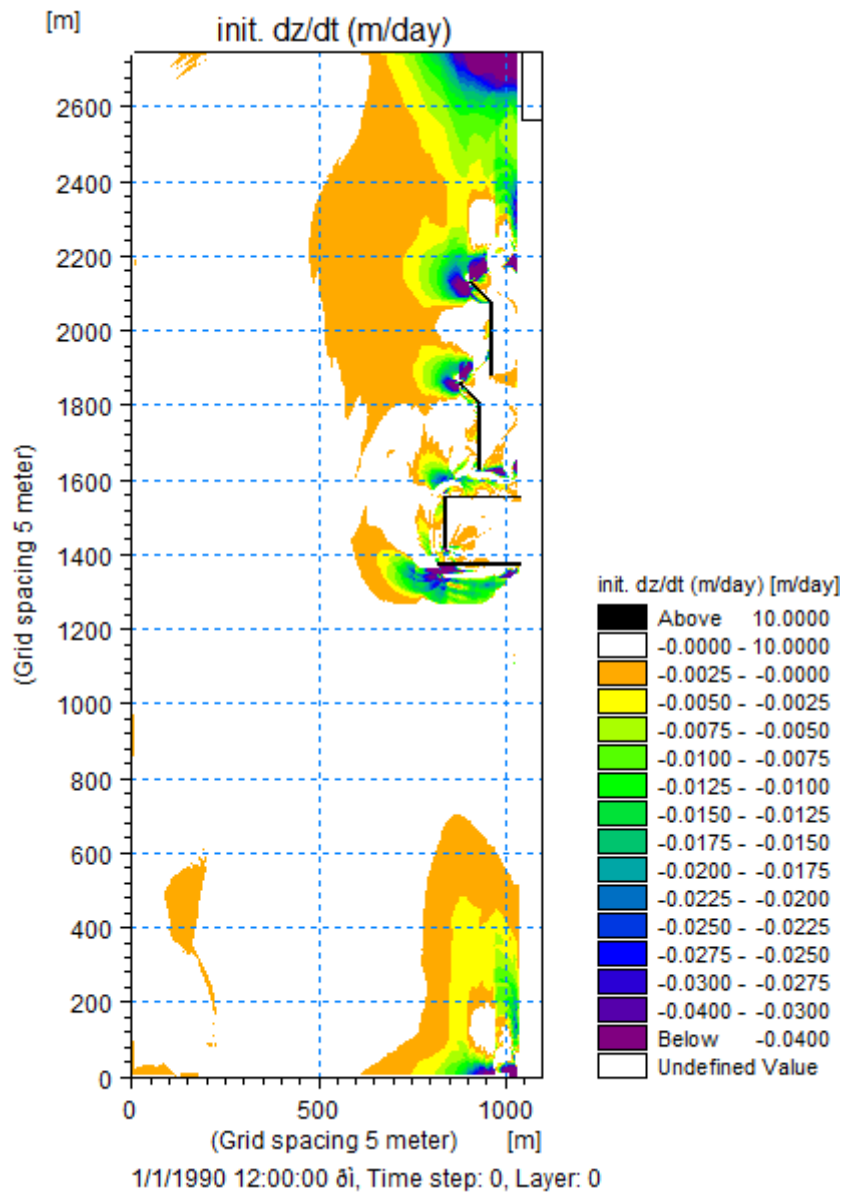


Σχήμα A.13 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 3



Σχήμα A.14 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 4

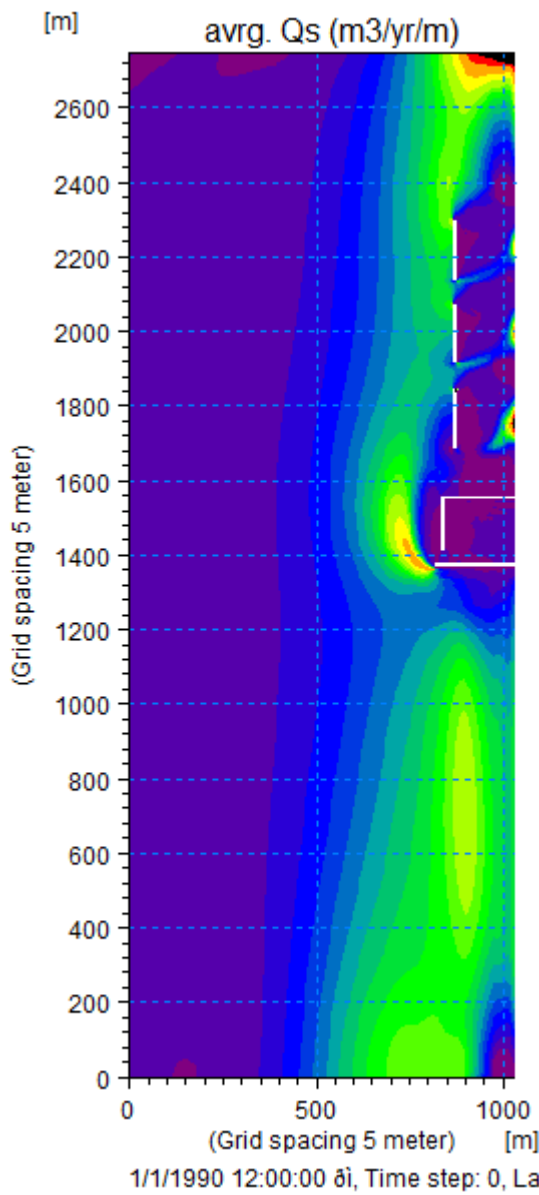
Δοκιμή 5



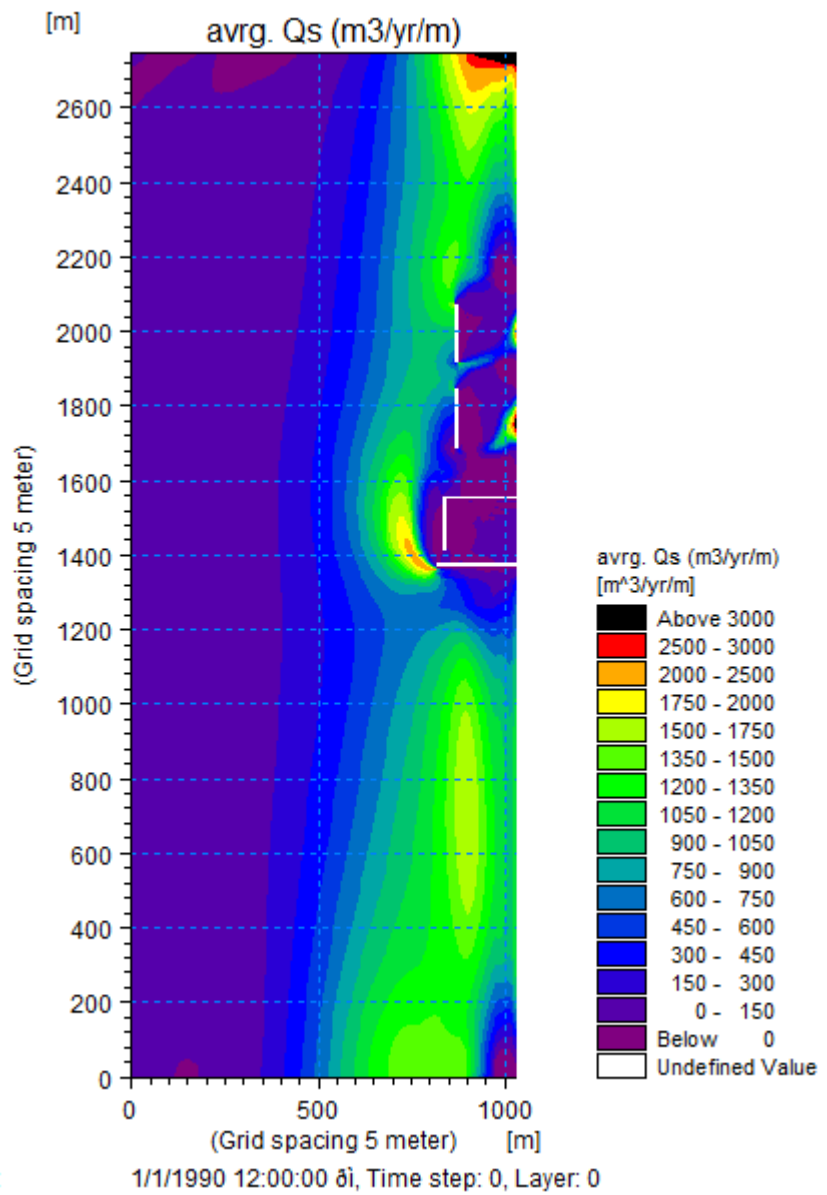
Σχήμα Α.15 Αποτελέσματα ρυθμού διάβρωσης για τη Δοκιμή 5

Αποτελέσματα στερεομεταφοράς

Δοκιμή 1 και 2

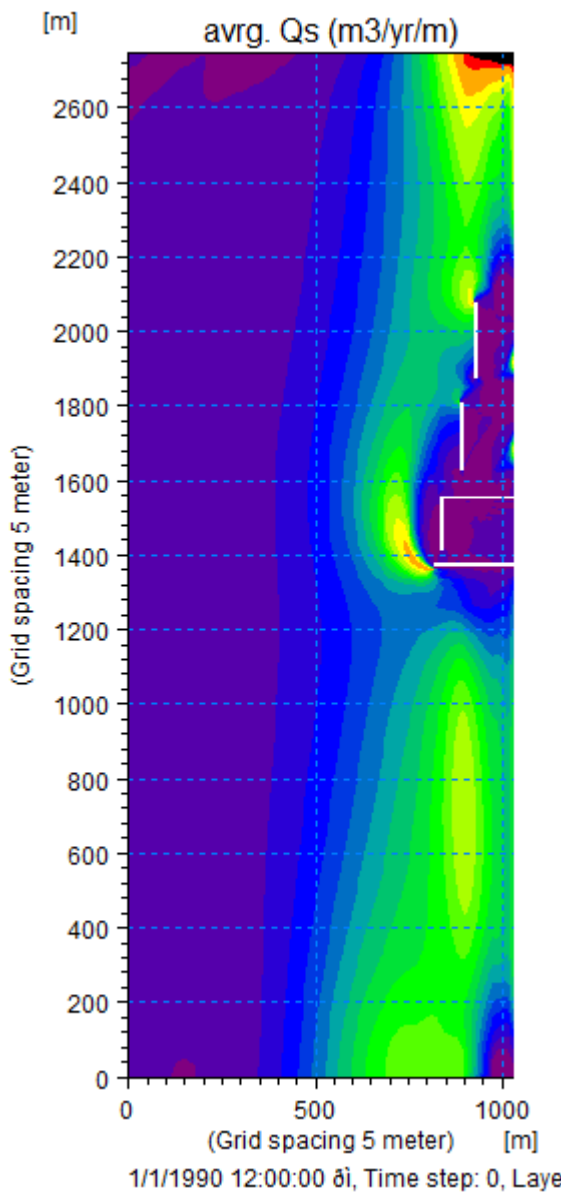


Σχήμα A.16 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 1

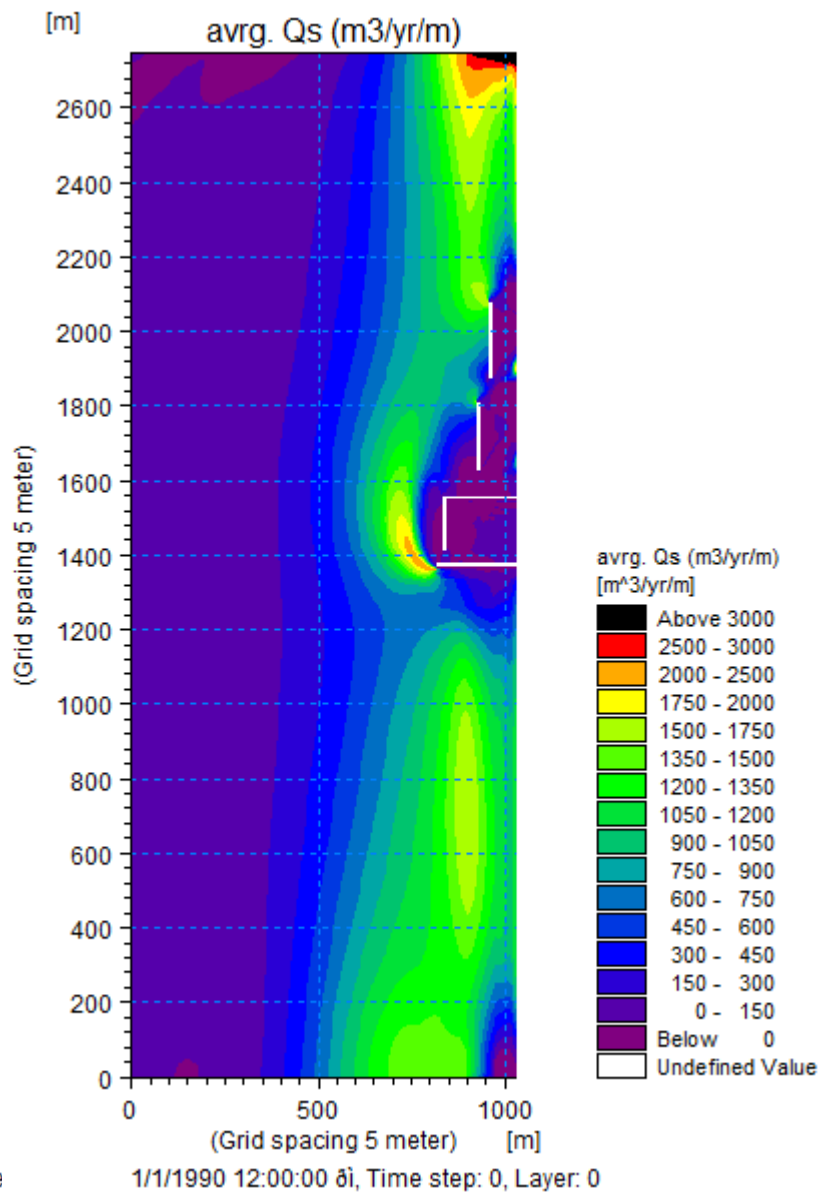


Σχήμα A.17 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 2

Δοκιμή 3 και 4

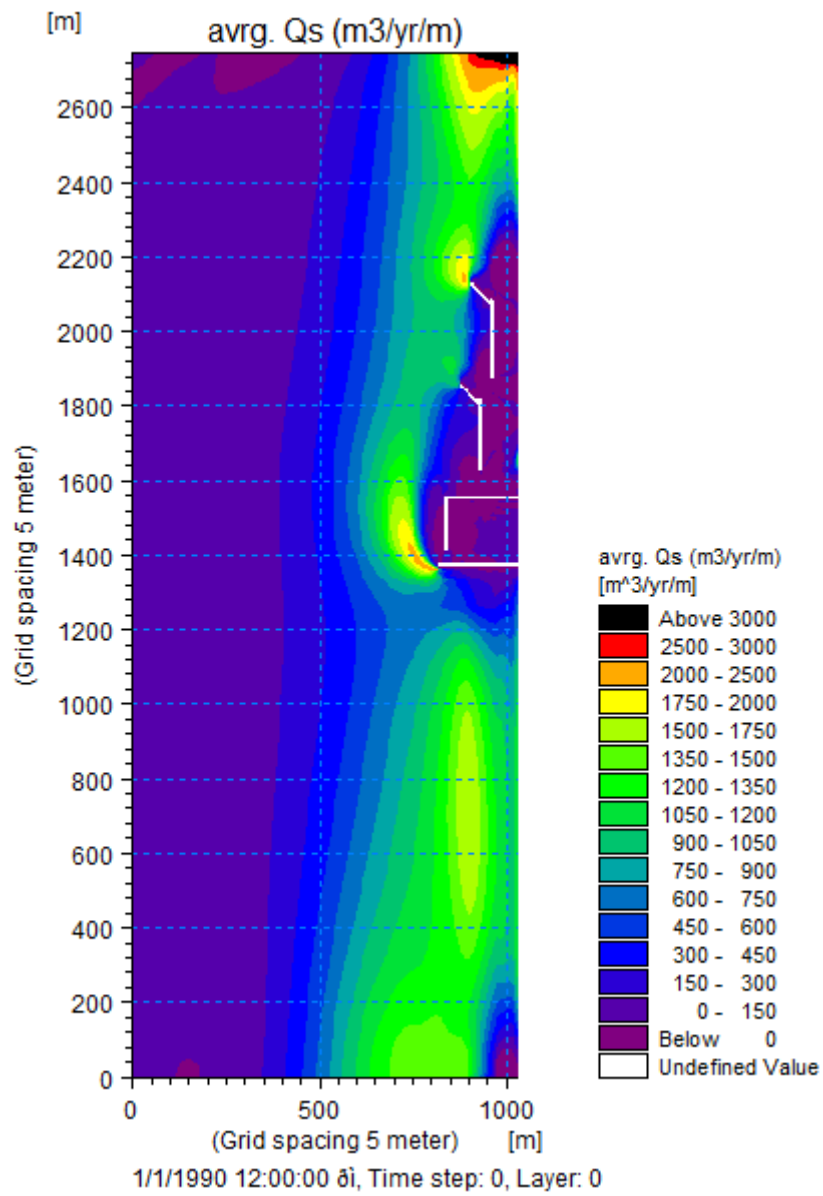


Σχήμα A.18 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 3



Σχήμα A.19 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 4

Δοκιμή 5



Σχήμα A.20 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για τη Δοκιμή 5